

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA
TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO DE UNA INTERFAZ DE
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA BASE
DE DATOS DE HRTF**

ALEJANDRO MELÉNDEZ DÍEZ

Septiembre 2013



PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

TEMA:

TÍTULO: DISEÑO DE UNA INTERFAZ DE REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA BASE DE DATOS DE HRTF

AUTOR: ALEJANDRO MELÉNDEZ DÍEZ

TUTOR: ELENA BLANCO MARTÍN

Vº Bº.

DEPARTAMENTO: DIAC

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: D. RICARDO MONEDERO MATEO

VOCAL: D. JUAN JOSÉ GÓMEZ ALFAGEME

VOCAL SECRETARIO: D^a. ELENA BLANCO MARTÍN

DIRECTOR:

Fecha de lectura: 27 DE SEPTIEMBRE

Calificación:

El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

Este proyecto consiste en la creación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) en entorno de MATLAB que realice una representación gráfica de la base de datos de HRTF (Head-Related Transfer Function).

La base de datos de HRTF contiene la información binaural de diferentes puntos de ubicación de la fuente sonora, formando una red de coordenadas esféricas que envuelve la cabeza del sujeto. Será necesario realizar los cálculos de interpolación para todos aquellos puntos no contenidos en la base de datos HRTF.

La interfaz se ha diseñado con la filosofía impuesta por las necesidades de un usuario que busca una herramienta práctica y de manejo intuitivo. Su diseño de una sola ventana hace posible la representación gráfica de las HRTF, las HRIR y los parámetros de localización espacial, ITD e ILD. El usuario podrá ir alternando las representaciones gráficas a la vez que introduce las coordenadas de los puntos que desea visualizar, definidas por phi (elevación) y theta (azimut). Esta faceta de la interfaz es la que le otorga una gran facilidad de acceso y lectura de la información representada en ella.

Se completa con un trabajo de investigación y estudio comparativo de la función y la aplicación de las bases de datos de HRTF dentro del marco científico y de investigación

*A mi familia, por su apoyo incondicional,
a mis amigos, por estar ahí siempre
y en especial a ti, Lucía,
que jamás has dejado de confiar en mí*

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
Capítulo 1. Introducción y objetivos	7
Capítulo 2. Aspectos teóricos	
2.1 Introducción	9
2.2 Localización espacial	10
Capítulo 3. Base de datos HRTF	19
3.1. Descripción	19
3.2. HRTF	23
3.3. HRIR	26
3.4. ITD / ILD	29
3.5. Interpolación	31
Capítulo 4. GUIDE en entorno de MATLAB	
4.1 Introducción	35
4.2 Creación de una GUI	35

Capítulo 5. Diseño de la interfaz gráfica de usuario

5.1	Introducción y filosofía	43
5.2	Manual de usuario	44
5.2.1	Objetivo del programa	44
5.2.2	Componentes de diseño	45
5.2.3	Diagrama de flujo	50
5.2.4	Descripción de funciones e implementación	52
5.2.4.1	Introducción de datos	53
5.2.4.2	Representación de datos	61

Capítulo 6. Trabajo de investigación de HRTF

6.3	Introducción	67
6.2	Desarrollo	68
6.3	Conclusión	74

Capítulo 7. Conclusiones

7.1	Aportaciones	77
7.2	Líneas futuras	78

Capítulo 8. Implementación en MATLAB 79

Capítulo 9. Referencias bibliográficas 81

Tabla de figuras 87

Acrónimos y símbolos de interés 89

RESUMEN

El actual proyecto consiste en la creación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) en entorno de MATLAB que realice una representación gráfica de la base de datos de HRTF (Head-Related Transfer Function).

La función de transferencia de la cabeza es una herramienta muy útil en el estudio de la capacidad del ser humano para percibir su entorno sonoro, además de la habilidad de éste en la localización de fuentes sonoras en el espacio que le rodea. La HRTF biaural (terminología para referirse al conjunto de HRTF del oído izquierdo y del oído derecho) en sí misma, posee información de especial interés ya que las diferencias entre las HRTF de cada oído, conceden la información que nuestro sistema de audición utiliza en la percepción del campo sonoro. Por ello, la funcionalidad de la interfaz gráfica creada presenta gran provecho dentro del estudio de este campo.

Las diferencias interaurales se caracterizan en amplitud y en tiempo, variando en función de la frecuencia. Mediante la transformada inversa de Fourier de la señal HRTF, se obtiene la repuesta al impulso de la cabeza, es decir, la HRIR (Head-Related Impulse Response). La cual, además de tener una gran utilidad en la creación de software o dispositivos de generación de sonido envolvente, se utiliza para obtener las diferencias ITD (Interaural Time Difference) e ILD (Interaural Time Difference), comúnmente denominados “parámetros de localización espacial”.

La base de datos de HRTF contiene la información biaural de diferentes puntos de ubicación de la fuente sonora, formando una red de coordenadas esféricas que envuelve la cabeza del sujeto. Dicha red, según las medidas realizadas en la cámara anecoica de la EUITT (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación), presenta una precisión en elevación de 10° y en azimut de 5° . Los receptores son dos micrófonos alojados en el maniquí acústico llamado HATS (Hats and Torso Simulator) modelo 4100D de Brüel&Kjaer. Éste posee las características físicas que influyen en la percepción del entorno como son las formas del pabellón auditivo (pinna), de la cabeza, del cuello y del torso humano.

Será necesario realizar los cálculos de interpolación para todos aquellos puntos no contenidos en la base de datos HRTF, este proceso es sumamente importante no solo para potenciar la capacidad de la misma sino por su utilidad para la comparación entre otras bases de datos existentes en el estudio de este ámbito.

La interfaz gráfica de usuario está concebida para un manejo sencillo, claro y predecible, a la vez que interactivo. Desde el primer boceto del programa se ha tenido clara su filosofía, impuesta por las necesidades de un usuario que busca una herramienta práctica y de manejo intuitivo. Su diseño de una sola ventana reúne tanto los componentes de obtención de datos como los que hacen posible la representación gráfica de las HRTF, las HRIR y los parámetros de localización espacial, ITD e ILD.

El usuario podrá ir alternando las representaciones gráficas a la vez que introduce las coordenadas de los puntos que desea visualizar, definidas por ϕ (elevación) y θ (azimut). Esta faceta de la interfaz es la que le otorga una gran facilidad de acceso y lectura de la información representada en ella. Además, el usuario puede introducir valores incluidos en la base de datos o valores intermedios a estos, de esta manera, se indica a la interfaz la necesidad de realizar la interpolación de los mismos.

El método de interpolación escogido es el de la ponderación de la distancia inversa entre puntos. Dependiendo de los valores introducidos por el usuario se realizará una interpolación de dos o cuatro puntos, siendo éstos limítrofes al valor introducido, ya sea de ϕ o θ . Para añadir versatilidad a la interfaz gráfica de usuario, se ha añadido la opción de generar archivos de salida en forma de imagen de las gráficas representadas, de tal forma que el usuario pueda extraer los datos que le interese para cualquier valor de ϕ y θ .

Se completa el presente proyecto fin de carrera con un trabajo de investigación y estudio comparativo de la función y la aplicación de las bases de datos de HRTF dentro del marco científico y de investigación. Esto ha hecho posible concentrar información relacionada a través de revistas científicas de investigación como la JAES (Journal of the Audio Engineering Society) o la ASA (Acoustical Society of America), además, del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) o la “Web of knowledge” entre otras. Además de realizar la búsqueda en estas fuentes, se ha optado por vías de información más comunes como Google Académico o el portal de acceso “Ingenio” a los todos los recursos electrónicos contenidos en la base de datos de la universidad.

El estudio genera una ampliación en el conocimiento de la labor práctica de las HRTF. La mayoría de los estudios enfocan sus esfuerzos en mejorar la percepción del evento sonoro mediante su simulación en la escucha estéreo o multicanal. A partir de las HRTF, esto es posible mediante el análisis y el cálculo de datos como pueden ser las regresiones, siendo éstas muy útiles en la predicción de una medida basándose en la información de la actual.

Otro campo de especial interés es el de la generación de sonido 3D. Mediante la base de datos HRTF es posible la simulación de una señal binaural. Se han diseñado algoritmos que son implementados en dispositivos DSP, de tal manera que por medio de retardos interaurales y de diferencias espectrales es posible llegar a un resultado óptimo de sonido envolvente, sin olvidar la importancia de los efectos de reverberación para conseguir un efecto creíble de sonido envolvente. Debido a la complejidad computacional que esto requiere, gran parte de los estudios coinciden en desarrollar sistemas más eficientes, llegando a objetivos tales como la generación de sonido 3D en tiempo real.

ABSTRACT

This project involves the creation of a Graphic User Interface (GUI) in the Matlab environment which creates a graphic representation of the HRTF (Head-Related Transfer Function) database.

The head transfer function is a very useful tool in the study of the capacity of human beings to perceive their sound environment, as well as their ability to localise sound sources in the area surrounding them. The binaural HRTF (terminology which refers to the HRTF group of the left and right ear) in itself possesses information of special interest seeing that the differences between the HRTF of each ear admits the information that our system of hearing uses in the perception of each sound field. For this reason, the functionality of the graphic interface created presents great benefits within the study of this field.

The interaural differences are characterised in space and in time, varying depending on the frequency. By means of Fourier's transformed inverse of the HRTF signal, the response to the head impulse is obtained, in other words, the HRIR (Head-Related Impulse Response). This, as well as having a great use in the creation of software or surround sound generating devices, is used to obtain ITD differences (Interaural Time Difference) and ILD (Interaural Time Difference), commonly named “spatial localisation parameters”.

The HRTF database contains the binaural information of different points of sound source location, forming a network of spherical coordinates which surround the subject's head. This network, according to the measures carried out in the anechoic chamber at the EUITT (School of Telecommunications Engineering) gives a precision in elevation of 10° and in azimuth of 5° . The receivers are two microphones placed on the acoustic mannequin called HATS (Hats and Torso Simulator) Brüel&Kjaer model 4100D. This has the physical characteristics which affect the perception of the surroundings which are the forms of the auricle (pinna), the head, neck and human torso.

It will be necessary to make interpolation calculations for all those points which are not contained the HRTF database. This process is extremely important not only to strengthen the database's capacity but also for its usefulness in making comparisons with other databases that exist in the study of this field.

The graphic user interface is conceived for a simple, clear and predictable use which is also interactive. Since the first outline of the program, its philosophy has been clear, based on the needs of a user who requires a practical tool with an intuitive use. Its design with only one window unites not only the components which obtain data but also those which make the graphic representation of the HRTFs possible, the hrir and the ITD and ILD spatial location parameters.

The user will be able to alternate the graphic representations at the same time as entering the point coordinates that they wish to display, defined by ϕ (elevation) and θ (azimuth). The facet of the interface is what provides the great ease of access and reading of the information displayed on it. In addition, the user can enter values included in the database or values which are intermediate to these. It is, likewise, indicated to the interface the need to carry out the interpolation of these values.

The interpolation method is the deliberation of the inverse distance between points. Depending on the values entered by the user, an interpolation of two or four points will be carried out, with these being adjacent to the entered value, whether that is ϕ or θ . To add versatility to the graphic user interface, the option of generating output files in the form of an image of the graphics displayed has been added. This is so that the user may extract the information that interests them for any ϕ and θ value.

This final project is completed with a research and comparative study essay on the function and application of HRTF databases within the scientific and research framework. It has been possible to collate related information by means of scientific research magazines such as the JAES (Journal of the Audio Engineering Society), the ASA (Acoustical Society of America) as well as the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) and the “Web of knowledge” amongst others. In addition to carrying out research with these sources, I also opted to use more common sources of information such as Academic Google and the “Ingenio” point of entry to all the electronic resources contained on the university databases.

The study generates an expansion in the knowledge of the practical work of the HRTF. The majority of studies focus their efforts on improving the perception of the sound event by means of its simulation in stereo or multichannel listening. With the HRTFs, this is possible by means of analysis and calculation of data as can be the regressions. These are very useful in the prediction of a measure being based on the current information.

Another field of special interest is that of the generation of 3D sound. Through HRTF databases it is possible to simulate the binaural signal. Algorithms have been designed which are implemented in DSP devices, in such a way that by means of interaural delays and wavelength differences it is possible to achieve an excellent result of surround sound, without forgetting the importance of the effects of reverberation to achieve a believable effect of surround sound. Due to the computational complexity that this requires, a great many studies agree on the development of more efficient systems which achieve objectives such as the generation of 3D sound in real time.

Capítulo 1. Introducción y objetivos

El presente proyecto fin de carrera persigue la creación de una interfaz de representación gráfica de la base de datos HRTF. La representación de datos del programa diseñado no aportan información alguna si previamente no se comprende su motivo y su finalidad, por ello y en primera estancia, se realiza una indagación teórica de todos los aspectos teóricos a tener en cuenta.

La HRTF es la función de transferencia de la cabeza, una medida que se utiliza para el estudio de la percepción humana del sonido, a través de dichos datos se extraen otros parámetros como la respuesta al impulso, HRIR, y de los parámetros de localización espacial ITD e ILD, los cuales son necesarios y determinantes para comprender cómo es el sistema auditivo humano [Blauert 97]. Cada uno de ellos aporta información relevante, siendo mutuamente complementarios. Remarcar que el actual proyecto parte con la base de datos ya medida, más adelante el lector podrá entender cómo y en qué condiciones se realizaron estas medidas.

En el capítulo 3 “Base de datos de HRTF” se realiza una descripción de la naturaleza y función que posee esta información.

Desde un principio, se tuvo la sólida idea de que el diseño de la interfaz debería de ser ante todo, sencilla y fácil de usar. Se ha seguido una filosofía impuesta por las necesidades de un usuario que busca una herramienta práctica y de manejo intuitivo. Para ello, la interfaz está compuesta por componentes como figuras, ejes, etiquetas, botones, conmutadores, además de mensajes que interactúan con el usuario dependiendo del estado de la aplicación para poder guiarle obteniendo la mejor experiencia de uso de la misma. En el capítulo 4 “GUIDE en entorno de MATLAB” se hace una breve descripción del funcionamiento del programa utilizado para la creación de la interfaz gráfica de usuario (GUI).

En el capítulo 5 “Diseño de la interfaz gráfica de usuario” se desarrolla la explicación detallada de la interfaz diseñada especificando su funcionalidad. En el mismo capítulo se ha considerado la necesidad que disponer de un diagrama de flujo que describa de manera visual y conceptual la acción del usuario y la reacción a ésta del programa. Además, se dispone de un manual de usuario que ofrece al lector una mejor comprensión del mismo.

Se tiene como objetivo, además del diseño de la interfaz, el estudio del el uso y la aplicación de la medida HRTF en el marco científico y de investigación. Todo ello se expone en el capítulo 6 “Trabajo de investigación de HRTF”. Se ha realizado una búsqueda de información a través de revistas científicas como la JAES (Journal of the Audio Engineering Society), ASA (Acoustical Society of America), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) o “Web of knowledge”. Artículos obtenidos en estas revistas coinciden en que la aplicación de las HRTF sirve para comprender y desarrollar el sistema de audición humana por medio de técnicas de procesado de datos que hagan posible la creación de modelos generales en donde basar fielmente los resultados.

Los resultados obtenidos y su finalidad se describen en el capítulo 7 “Conclusiones”, donde se establece un esquema de análisis de la funcionalidad del proyecto.

En el capítulo 8 “Referencias bibliográficas” se detalla las fuentes de información consultadas sirviendo de gran ayuda para la creación del presente proyecto fin de carrera.

Capítulo 2. Aspectos teóricos

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta con una descripción de los aspectos teóricos que explican el fenómeno de localización espacial. El sistema de audición humano tiene una notable capacidad para determinar la dirección en que se originan los sonidos y la ubicación de la fuente sonora que los produce.

La psicoacústica estudia cómo están relacionadas las propiedades del campo sonoro con las impresiones de escucha, es decir, con las percepciones auditivas. La percepción auditiva tiene la ventaja de extenderse en todas direcciones alrededor del sujeto mientras que la percepción visual se restringe a su región frontal, lo cual permite una alineación óptima de los sistemas visual y auditivo durante la adquisición de información. Los experimentos que estudian la audición espacial deben hacerse en un campo sonoro libre, sin reflexiones, ya que pueden considerarse como “fuentes sonoras” espejo provocando que haya más de una “fuente” que produzca sonido.

Es necesario disponer de un sistema de referencia espacial para los procesos experimentales y así, determinar el suceso auditivo o punto de medida, determinando la localización de la fuente sonora. En la *figura 1* se muestra dicho sistema, determinando el origen de coordenadas como el centro de la cabeza, a mitad de camino entre los extremos superiores de las entradas a los canales auditivos. Éstos, junto con los límites inferiores de las cuencas de los ojos, se definen el plano horizontal. El plano frontal contiene la línea que une los límites superiores de las entradas a los canales auditivos e intersecta con el plano horizontal formando un ángulo recto. Los tres planos intersectan el origen de coordenadas. Para definir el punto de localización usaremos dos ángulos, φ (Phi) para la elevación, θ (Theta) para el azimut y una distancia d , que indica la distancia del origen de coordenadas al punto de medida.

A continuación, se entra más en detalle sobre el comportamiento que nuestro sistema de audición se basa para realizar una correcta localización de la fuente o las fuentes sonoras.

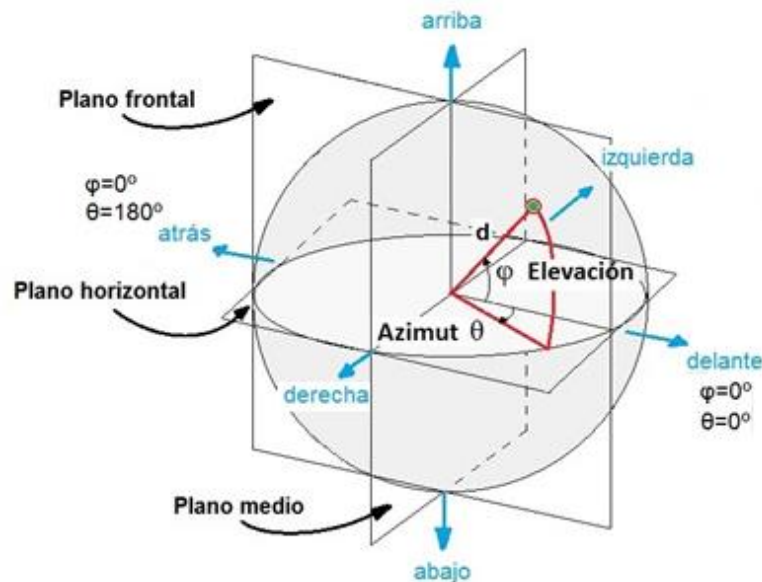


Figura 1. Sistema de coordenadas esférico, muestra tanto los planos de definición para la cabeza como las principales coordenadas caracterizadas por los ángulos φ y θ .

2.2 Localización espacial

Esta sección conforma los aspectos más importantes que intervienen en la localización espacial.

El ser humano posee una audición binaural, la presencia de dos receptores hace posible que sea capaz de localizar la posición de la fuente sonora o la dirección del suceso auditivo. Se basa en que para cualquier posición de la fuente sonora, la información que recibe un oído difiere con el otro. Tal información se procesa en el cerebro donde comparando e interpretando los impulsos nerviosos se llega a la formación del suceso auditivo, en el cual se distinguen diferentes aspectos como los mostrados a continuación. [Lahoz 09]

- La naturaleza de la fuente.
- El espacio acústico y el comportamiento de las reflexiones.
- La influencia del torso, cabeza y oreja.
- La experiencia o entrenamiento del oyente en la localización de fuentes de sonido.

Los estudios de Lord Rayleigh y su Teoría Dúplex [Blauert 97] afirman que son dos factores los que intervienen en el fenómeno de determinación de la ubicación de la fuente sonora.

1. Las **diferencias temporales** de entrada a cada oído, se denotan a través de los acrónimos ITD (Interaural Time Difference). Gracias al carácter biaural de la audición, este parámetro es de especial importancia en el plano horizontal. Esto es debido a que la diferencia de caminos respectivos de cada posición a ambos oídos será distinta para cada posición posible a lo largo del plano horizontal. Un sonido será percibido hacia un lado dependiendo de la onda que llegue primero, a mayor valor de la ITD indica mayor desplazamiento lateral. La siguiente figura representa este hecho para dos valores diferentes de azimuth (manteniendo la misma elevación).

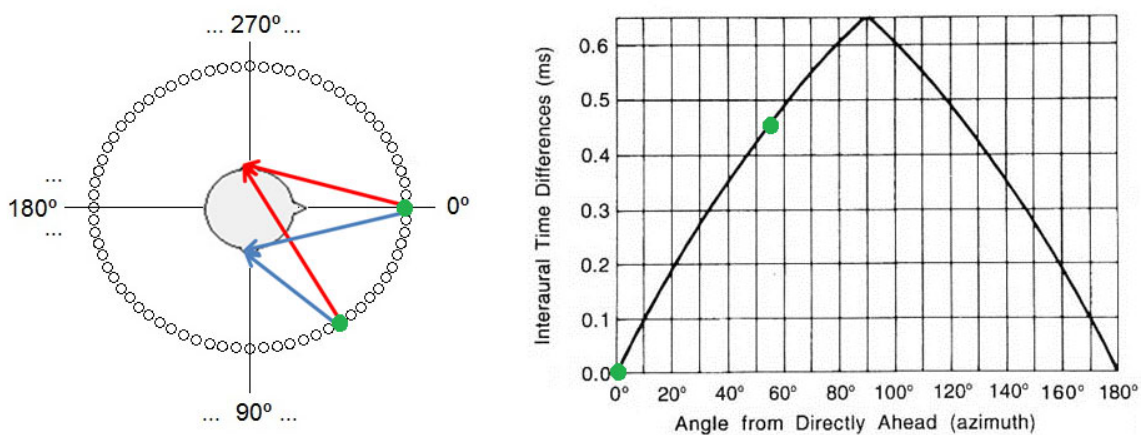
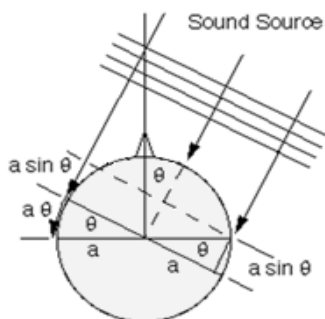


Figura 2. Representación gráfica de la ITD en función del ángulo de azimuth.

Se toma el mayor valor de ITD cuando la fuente está colocada en $\theta=90^\circ$ y en $\theta=270^\circ$, siendo su valor aproximadamente $690\mu s$. Por el contrario, la ITD es cero para los valores de azimuth de $\theta=0^\circ$ y de $\theta=180^\circ$, siendo las distancias fuente-oído idénticas. Si se considera la cabeza como una esfera y ondas planas aproximándose al oyente, se puede utilizar la fórmula matemática, que se muestra en la siguiente figura, para obtener el ángulo de azimuth teniendo únicamente la ITD.



$$ITD = \frac{a}{c}(\theta + \sin \theta) \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

Figura 3. Esquema para el cálculo de la diferencia interaural de tiempo.

- Las **diferencias de nivel de presión sonora** entre las dos señales que llegan a cada oído, se denotan a través de los acrónimos ILD (Interaural Level Difference). El nivel de presión sonora que llega a cada oído depende en gran medida del camino recorrido por la onda acústica, cuanto mayor sea el recorrido mayor será la disminución de energía. Esto es debido a que la energía recibida de una fuente sonora es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (Ley de Divergencia Esférica). También depende de la influencia de la cabeza y el torso humano que interfieren de manera que producen cambios en la respuesta en frecuencia. Es conveniente remarcar que el espectro audible del ser humano abarca desde los 20Hz hasta los 20kHz en el ser humano.

En la *figura 3* se puede apreciar cómo varía el espectro de frecuencias en función de la posición de la fuente a lo largo del plano horizontal.

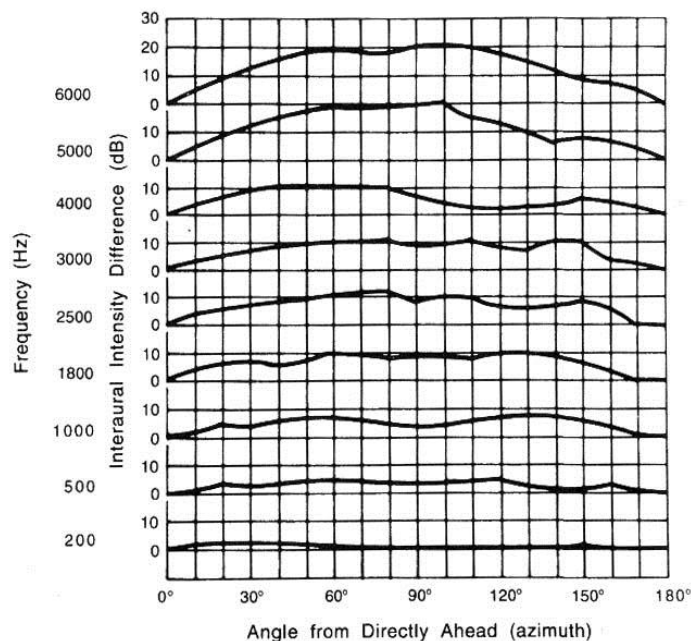


Figura 4. La respuesta en frecuencia se ve alterada función del azimut.

La ILD a frecuencias por debajo de 1.6kHz (longitud de onda proporcional al diámetro de la cabeza, 21cm) proporciona poca información. Al contrario ocurre por encima ya que el orden de la longitud de onda de la señal es mucho mayor que la distancia entre los dos oídos. De este modo la recepción de estas frecuencias no se ven alteradas por la presencia de la cabeza y torso. Por el contrario, la ITD a frecuencias por encima de 1.6kHz no aporta información pero sí por debajo porque representa una diferencia de fase perceptible como se observa en la *figura 4*. Todo lo expuesto está limitado a tonos puros como señal de excitación.

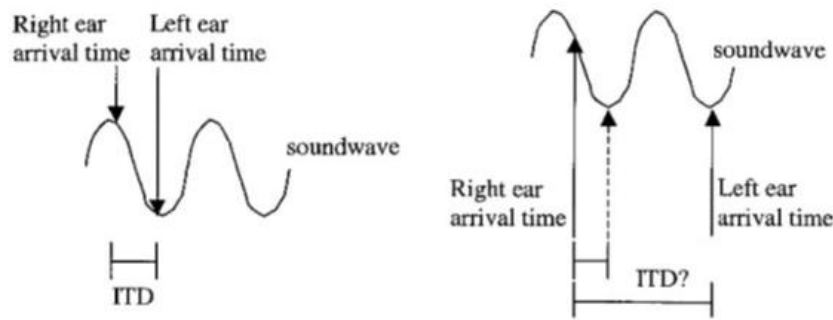


Figura 5. Izquierda: La ITD es menor que la longitud de onda, y derecha: La ITD es mayor que la longitud de onda haciendo confusa la determinación del azimut. [Cheng 99]

La Teoría Dúplex de Rayleigh dice que la ILD y la ITD juntas proporcionan información de localización para todo el rango de frecuencias. En la zona intermedia se utilizan ambas diferencias de forma simultánea y combinada. La *figura 5* muestra gráficamente los intervalos del espectro audible donde cada parámetro de localización espacial ofrece datos relevantes para la localización del evento sonoro.

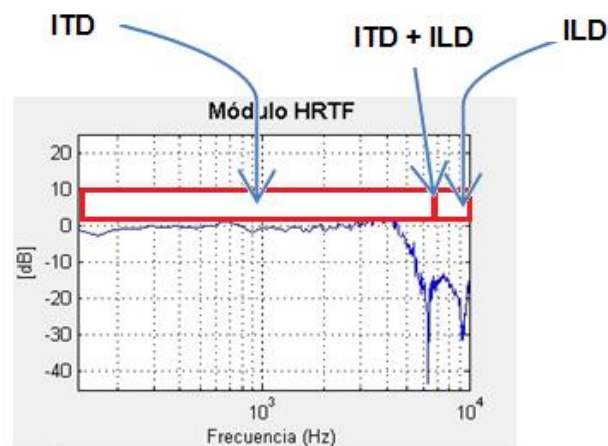


Figura 6. Representación de las zonas del espectro donde son más influyentes la ITD e ILD.

El pabellón auditivo actúa como una cavidad de resonancia atenuando frecuencias superiores a 6kHz, dado que es en esa región en la que las longitudes de onda son lo suficientemente pequeñas para interactuar con el pabellón auditivo. En la *figura 7* se puede observar que para direcciones frontales al oyente se produce un “notch”, un pico de atenuación sobre los 10kHz.

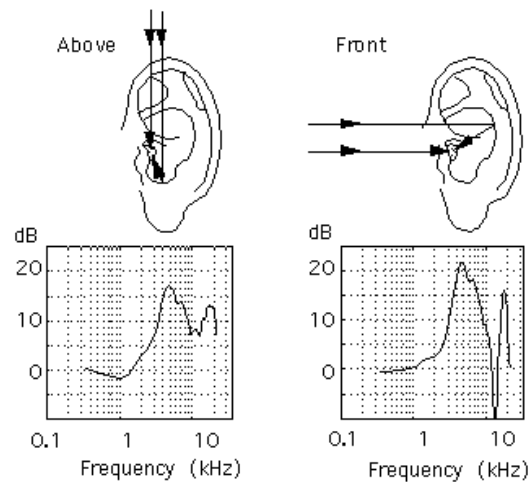


Figura 7. Efecto del pabellón auditivo en la respuesta en frecuencia para dos valores de elevación.

El sistema de localización no es del todo preciso, existen puntos espacialmente colocados donde los parámetros ITD e ILD son prácticamente idénticos. Esto significa que para estos puntos la determinación del azimuth deja mucho que desear, dichos puntos forman una superficie cónica, esto es debido a la similitud de la cabeza humana a una esfera. La figura 8 representa el denominado cono de confusión [Mills 72] donde se resalta la ambigüedad de delante-atrás (a-b) y la de elevación (x-y).

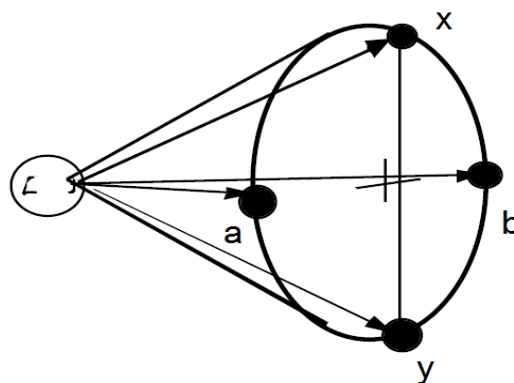


Figura 8. Cono de confusión [Begault 00], donde se dan resultados iguales (ITD e ILD).

Todos los aspectos comentados anteriormente detallan cómo varían las diferencias interaurales en relación al azimuth, es decir, para una elevación fija, la variación en el plano horizontal. Es preciso pues, saber qué procesos son los que el sistema de localización espacial realiza en el plano medio.

Mientras que la determinación de ángulos situados en el plano horizontal es binaural, la determinación de la elevación es monoaural. Los atributos monoaurales de las señales de entrada a los oídos suministran al sistema auditivo la información más relevante para determinar la distancia y dirección de elevación del sujeto al suceso auditivo. Esto es debido a que la forma de nuestras orejas interfiere en la respuesta en frecuencia.

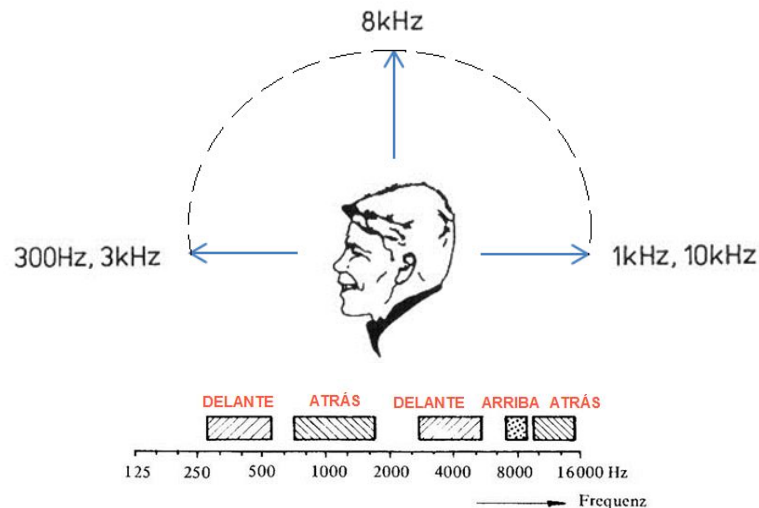


Figura 9. Fenómeno de localización en el plano medio caracterizado por la señal de excitación.

Según estudios realizados por Damaske y Wagener en 1969 [Blauert 97], la precisión para identificar a qué altura se presenta el suceso auditivo varía con el carácter de la señal de excitación. Si se trata de señales de banda estrecha menores de $2/3$ de octava no es posible su localización pero para mayores se obtienen direcciones que la figura 9 muestra. Los valores frecuenciales mostrados indican la frecuencia central del ancho de banda del ruido blanco ($>2/3$) para cada caso.

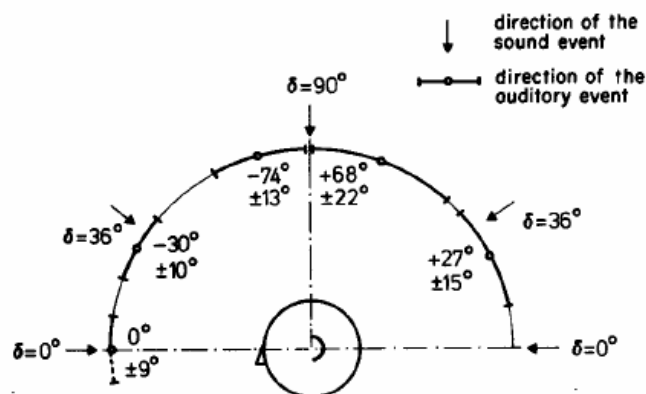


Figura 10. Gráfica representativa de la dependencia del ángulo de elevación en la precisión.

No existe diferencia de caminos para puntos situados a lo largo del plano medio, esto significa que las diferencias interaurales de tiempo son prácticamente nulas, por ello la precisión en este plano es mucho menor. La precisión varía entre los 9° hasta 17° para el habla humana y se llega a 4° para ruido blanco. La anterior figura muestra cómo varía la precisión en el plano medio en puntos que se sitúan por delante, por encima y por detrás de la cabeza del sujeto.

Investigaciones realizadas [Hofman 98] verifican que modificando el oído externo de sujetos humanos mediante unos moldes, la elevación se ve afectada puesto que la señal espectral es modificada. En la figura siguiente se puede observar una notable variación en frecuencia a partir de 6kHz.

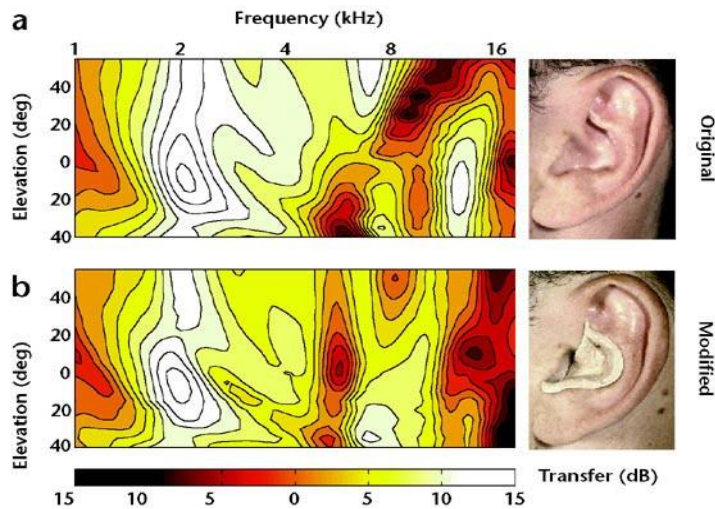


Figura 11. La imagen muestra cambios espectrales debido a la influencia de moldes en los oídos.

Aunque la localización de la elevación del sonido fue degradada drásticamente inmediatamente después de la modificación, pasado un tiempo se vuelve a adquirir considerablemente. Demostrando que el oyente es capaz de aprender y reorientarse a través de un entrenamiento.

Cuando el oyente trata de localizar una fuente sonora la precisión es muy buena estimando el azimut, peor estimando la elevación y poco hábil determinando la distancia a la fuente.

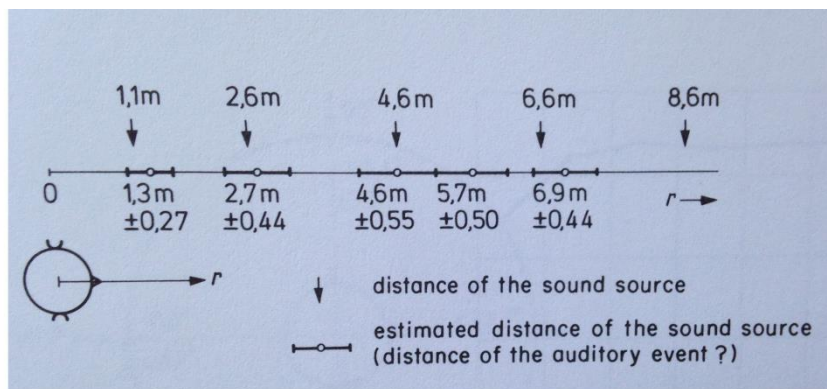


Figura 12. Imagen que representa la precisión de la distancia.[Blauert 97]

La figura anterior representa la precisión en distancia de localizar la fuente sonora. Se observa que para valores altos de r el sujeto va perdiendo la capacidad para localizar la fuente. Es debido por el fenómeno que describe la Ley de Divergencia Esférica, cuanto más lejos este la fuente menos nivel recibirá el sujeto. Esto indica por información para la resolución de la localización.

Factores como la intensidad, el movimiento de la cabeza, el exceso de diferencias interaurales de nivel, la relación entre sonido directo y el reverberante, contribuyen para determinar la distancia de la fuente sonora. El último factor nombrado es el que más interviene para la determinación de la distancia de la fuente sonora. El sonido es reflejado en las posibles paredes cercanas al oyente dando a éste una información valiosa de referencia espacial para la ubicación de la fuente sonora. Este fenómeno se denomina ecolocación, es la capacidad del reconocimiento de fuentes sonoras a través de sonidos reflejados, de aquí se extrae la importancia del efecto precedente para este menester.

Capítulo 3. Base de datos HRTF

3.1. Descripción

En esta sección de la presente memoria se llevará a cabo una descripción detallada de la base de datos HRTF (Head Related Transfer Function), así como su definición. En primera estancia se comentan las condiciones en que se realizó la medida y el equipo necesario para ello.

Se dispuso de la cámara anecoica del Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación. En este tipo de medidas los resultados deben conservar un mínimo de calidad. Las HRTF deben ser medidas en campo libre, no se debe producir reflexión sonora. La obtención de datos se realizó con el software, analizador de espectros además del sistema de medida PULSE de Brüel&Kjaer. Este sistema utiliza una frecuencia de muestreo de 65536 Hz y el número de muestras es de 1024. En la *figura 13* se representa el esquema de montaje donde se puede observar un altavoz de respuesta plana a una distancia de 2m (campo lejano). Se usó como señal de excitación ruido blanco (de 20Hz a 20kHz) en bandas de frecuencias de tercio de octava durante 3 segundos. [Merino 10]

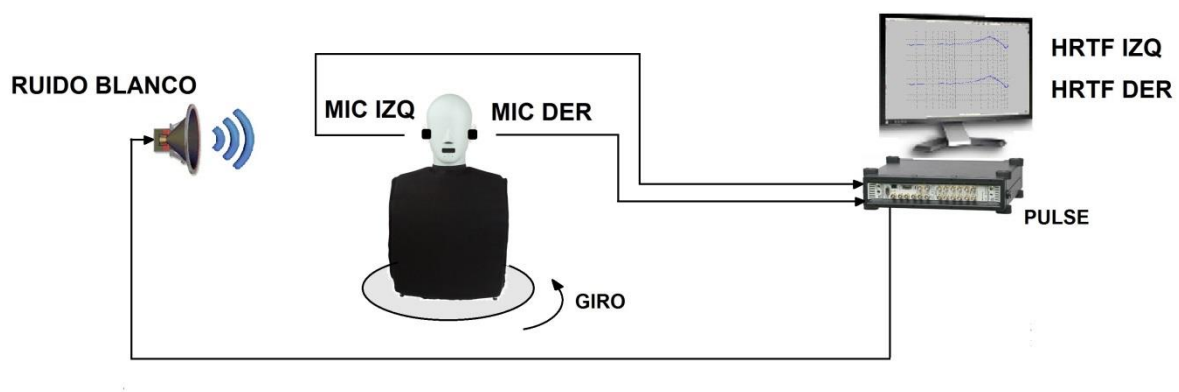


Figura 13. Representación esquemática de la disposición necesaria para la medida de HRTF.



Figura 14. Representación de la disposición fuente-receptor para la medida de HRTF.[Merino 10]

De esta forma, se tiene la misma energía para cada banda en los dos puntos de medida. Estos puntos son dos micrófonos alojados en los conductos auditivos de un maniquí acústico, el HATS modelo 4100D de Brüel&Kjaer. Éste simula la escucha auditiva y características anatómicas del ser humano.

En la *figura 14* se muestra la disposición necesaria para la obtención de las funciones de transferencia de la cabeza para cada oído. Por definición es una relación entre la medida recibida en cada micrófono y la medida recibida en la ausencia del HATS. De esta forma se consigue la relación necesaria para la obtención de la función de transferencia de la cabeza.

Asimismo, en la figura anterior se muestra las diferencias de la posición y orientación de la fuente sonora. Es necesario la obtención de puntos de medida situados tanto en el plano horizontal como el plano medio estableciendo como referencia la cabeza del maniquí acústico HATS.

La intención fue recoger dos medidas de la respuesta al impulso conocidas como HRIR (Head-Related Impulse Response) que posteriormente se transforman al dominio de la frecuencia a través de la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Este procedimiento lo realiza el sistema de medida PULSE. De esta forma se obtienen las HRTF, una para el oído izquierdo y otra para el oído derecho de cada uno de los puntos de medida que se ajustan a través de las coordenadas de elevación y azimut, ϕ (Phi) y θ (Theta) respectivamente.

A continuación, la *figura 15* muestra la resolución tanto en elevación como en azimut que se tuvo al realizar las medidas para formar la base de datos HRTF [Merino 10]. En este proyecto se toma como base principal para su representación gráfica.

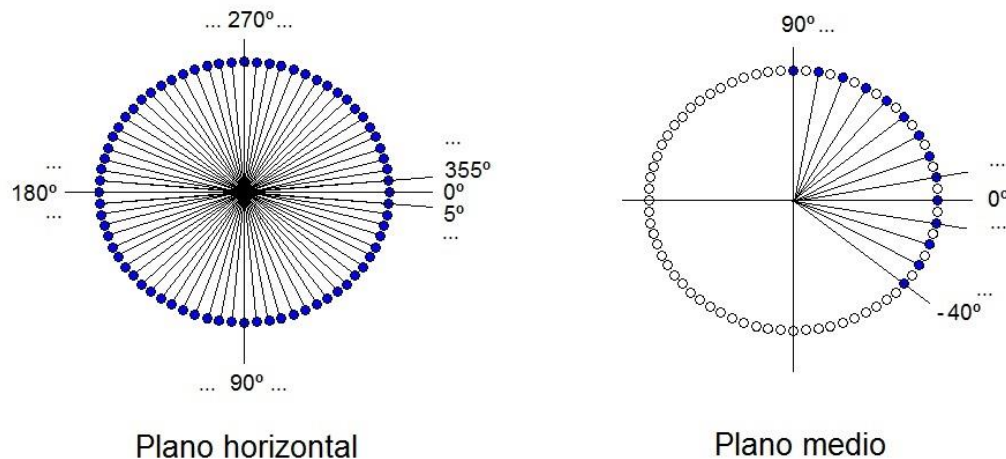


Figura 15. Representación visual de la resolución en grados para la obtención de datos.

Elevación → Desde $\varphi = -40^\circ$ hasta $\varphi = 90^\circ$

Azimut → Desde $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 355^\circ$

$\varphi=0$ y $\theta=0^\circ$ es la referencia donde el maniquí acústico HATS “mira” hacia delante.

De manera que se obtenga información de cada posición de la fuente sonora, se hace girar el maniquí acústico sincronizando cada medida con cada 5° de giro, obteniendo así, 72 puntos en cada plano horizontal definidos por cada ángulo de elevación ($\pm 10^\circ$). Si tenemos 14 valores de elevación y 72 valores de azimut tendremos $14 \times 72 = 1008$ puntos de medida posibles a representar en nuestra interfaz gráfica. De cada uno de los mismos tendremos la HRTF tanto del oído izquierdo como del oído derecho.

Para el desarrollo de la interfaz necesaria para la representación gráfica de estas medidas se parte de tres tipos de archivo .mat, las HRTF (Head Related Transfer Function), las HRIR (head-related impulse response) y los parámetros psicoacústicos ITD (Interaural Time Difference) e ILD (Interaural Level Difference) de cada elevación. Se dispondrá de $14 \times 3 = 42$ archivos.

Es preciso comentar que así como es posible realizar transformaciones entre el tiempo y la frecuencia, las HRIR se obtienen a partir de las HRTF y además, las tablas ITD e ILD se obtienen a partir de los datos de las HRIR. La siguiente figura muestra los procesos necesarios para dicha resolución de datos.

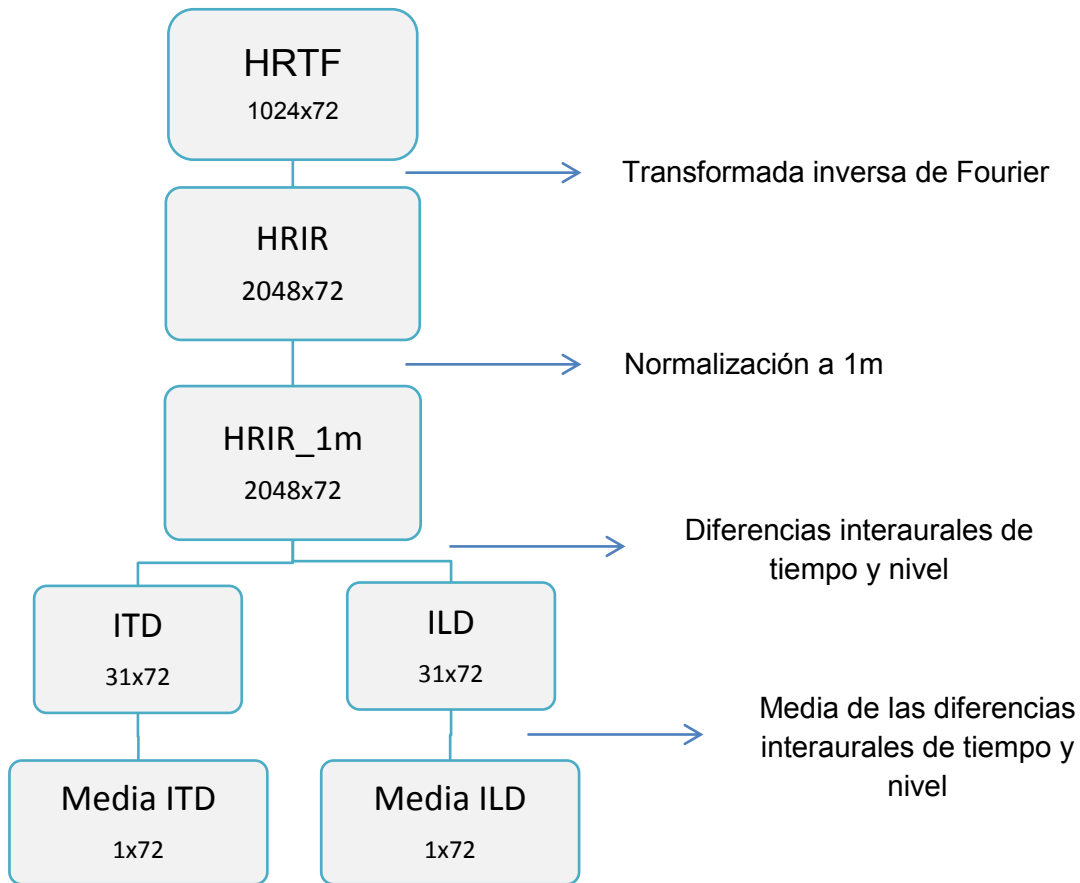


Figura 16. Gráfico que muestra el proceso de obtención de los diferentes datos relevantes.

En los siguientes apartados se explicarán estos tres tipos de datos en profundidad y los procesos que atraviesan hasta ser representados en la interfaz diseñada. La *figura 16* muestra de manera esquemática los procesos que sirven para una correcta representación en la interfaz diseñada. En cada cuadrado se muestra qué tipo de dato y su tamaño, información relevante para la implementación de los cálculos en MATLAB.

3.2. HRTF

La HRTF es la función de transferencia de la cabeza se define como el cociente entre una señal de salida siendo respuesta del sistema, y la señal de entrada que es la referencia (*Figura 17*). Es el primer paso hacia la comprensión de las variaciones del contenido espectral en la escucha direcciva. Las HRTF resume el efecto de filtrado acústico de la cabeza y torso, además del pabellón de la oreja, dependiendo de la dirección en emite la fuente sonora respecto al oyente.

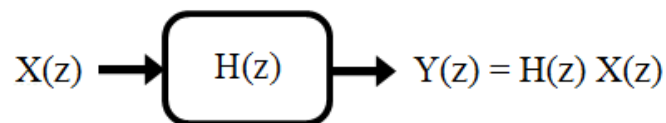


Figura 17. Función de transferencia en el dominio z.

Se define como la respuesta en frecuencia en campo lejano de un oído específico (izquierdo o derecho) de cada individuo, midiéndose desde diversos puntos definidos en el entorno espacial del sujeto. Esta medida nos informa de la variación de la amplitud y de la fase de cada una de las componentes de la señal. En caso del actual proyecto se utiliza la base de datos de HRTF obtenida con el maniquí acústico HATS [Merino 10], la intención fue conocer qué reciben los dos micrófonos alojados en HATS en función de lo se ha medido en el mismo punto en la ausencia de éste.

Además de tener una respuesta del sistema en función de la frecuencia, intervienen tres variables espaciales, la elevación ϕ , el azimut θ y la distancia r . Se determina así que la HRTF reúne los parámetros físicos más valiosos en ubicación de una fuente sonora. Este tipo de medidas se realizan en campo lejano como se ha comentado anteriormente, lo que reduce la HRTF a una función del azimut, la elevación y la frecuencia.

En cada toma de medida, el sistema PULSE nos da valores complejos en función de la frecuencia, con su módulo y fase. La siguiente figura reúne los 72 ángulos de azimut para una elevación de 0° siendo del oído izquierdo y derecho.

Cabe mencionar que mediante la transformada inversa de Fourier se consigue la expresión análoga en el dominio temporal denominada respuesta al impulso relativa a la cabeza, HRIR.

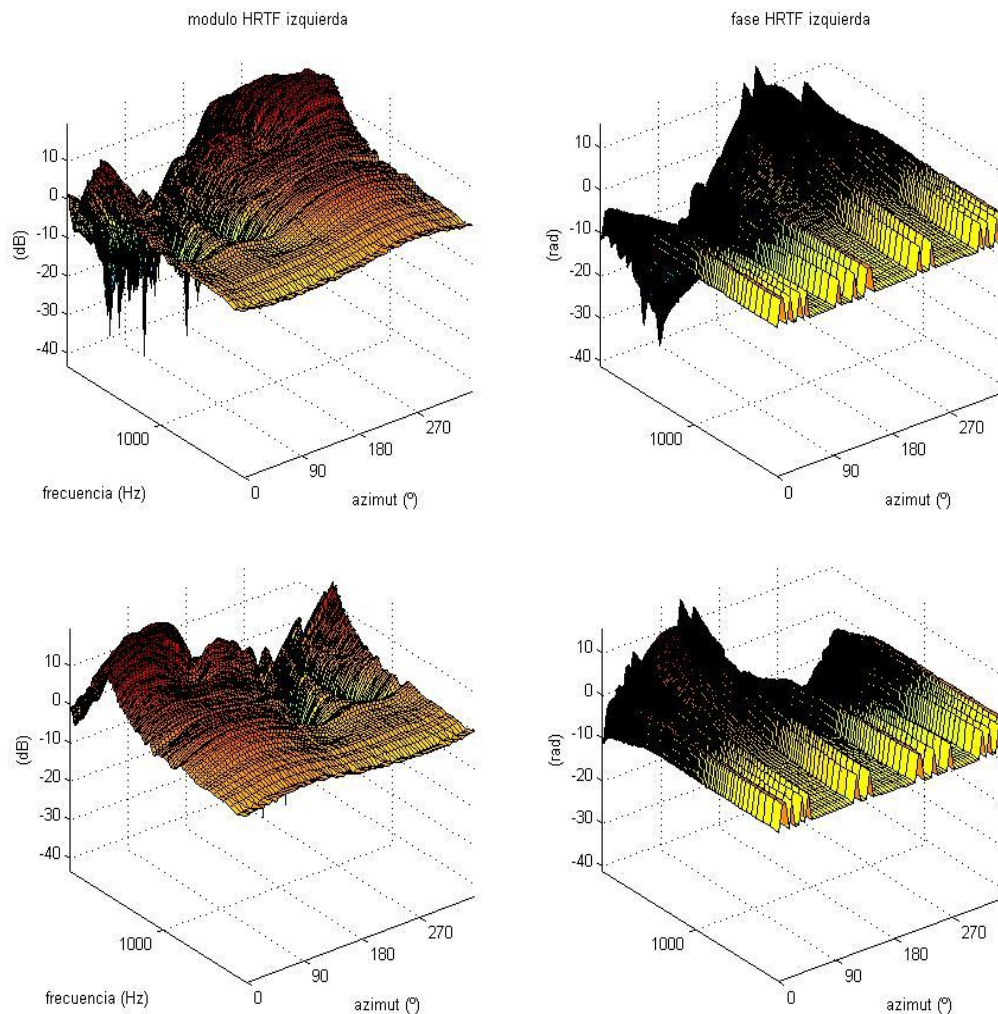


Figura 18. HRTF del oído izquierdo y del oído derecho, representa el módulo y la fase para 72 valores ($\varphi=0^\circ$).

Todo lo comentado en el capítulo 2 “Aspectos teóricos” se puede contrastar de manera visual en la *figura 18*.

Los niveles contenidos entre los ángulos $\theta=0^\circ$ hasta $\theta=180^\circ$ difieren entre el oído izquierdo y el derecho de forma que este último recibe la señal de la fuente de manera directa. Por ello no presenta ninguna atenuación como la que sufre la medida del oído izquierdo que presenta picos de caída en frecuencias por encima de 1.6kHz. Estas diferencias se deben a la presencia de oreja, de la cabeza y del torso del HATS.

Por contra, entre los ángulos $\theta=180^\circ$ hasta $\theta=360^\circ$ se tienen niveles opuestos al intervalo anterior. La HRTF izquierda posee mayor nivel que la derecha, se podría decir que tiene una variación simétrica a la anterior. El pico a los 4kHz se debe al efecto de resonancia del pabellón auditivo y la atenuación a los 10kHz es el “notch” comentado en el capítulo anterior (*Figura 7*).

Para una mayor comprensión visual la *figura 19* dispone las respuestas en frecuencia medidas tanto para el oído izquierdo como para el derecho con valores de azimut de $\varphi=0^\circ$ y $\varphi=90^\circ$, arriba y abajo respectivamente en la figura.

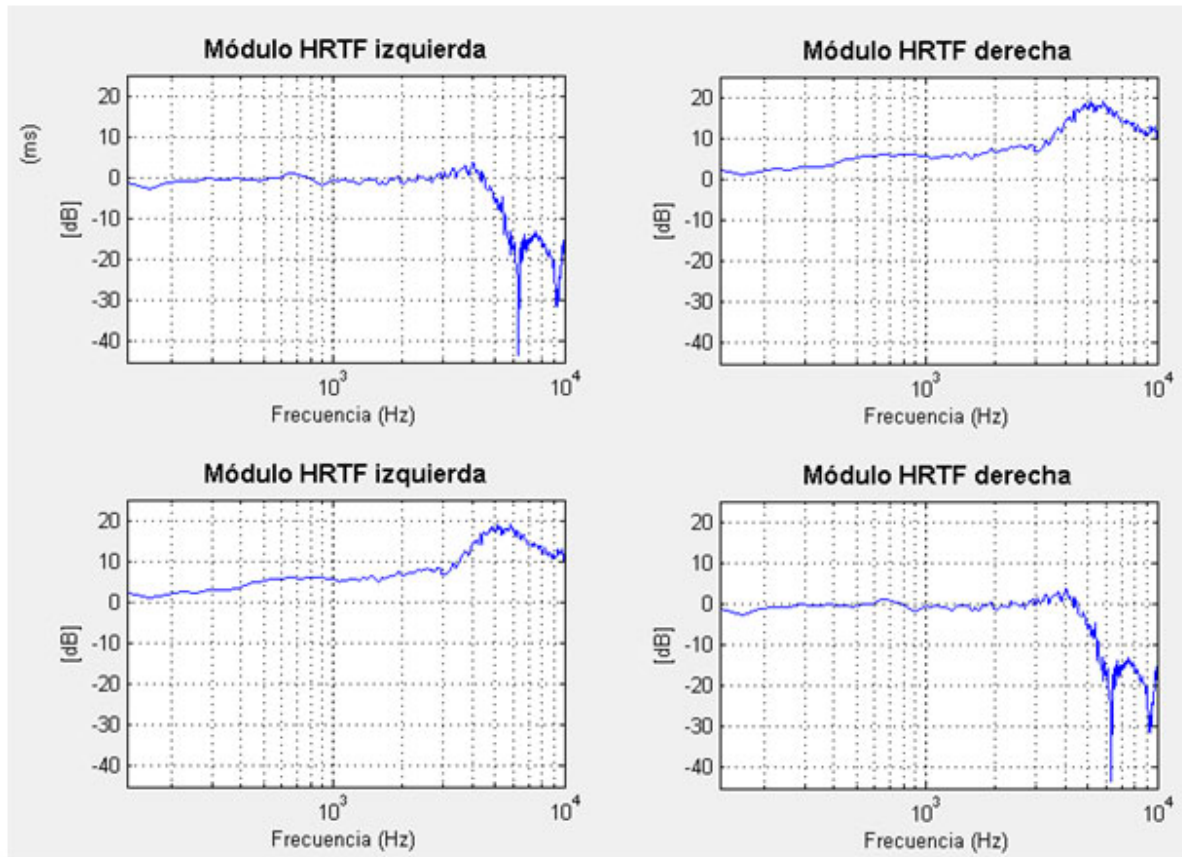


Figura 19. HRTF del oído izquierdo y del oído derecho, representa el módulo expresado en decibelios en función de la frecuencia.

En el primer caso de la figura la fuente sonora está colocada justo enfrente del oído derecho, $\varphi=0^\circ$ y $\varphi=90^\circ$. Se tiene señal directa en éste observando un realce a partir de los 3kHz hasta los 10kHz (arriba a la derecha).

Al contrario ocurre en el oído izquierdo, debido a la influencia de la cabeza se crean sombras acústicas en este intervalo. Las frecuencias bajas se mantienen prácticamente constantes. Se ha elegido la representación de los puntos espaciales $\varphi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ y $\varphi=0^\circ$, $\theta=180^\circ$ porque se comprende que esta disposición es característica para observar las diferencias espectrales, de nivel y de retardo de la señal.

3.3. HRIR

La HRIR se define como la respuesta al impulso de la cabeza, gracias a las medidas realizadas se disponen de dos HRIR, una para cada oído. De tal forma, se obtiene la respuesta binaural al impulso. La HRTF pertenece al dominio de la frecuencia, dado que en este dominio la respuesta del sistema es una multiplicación en el dominio del tiempo tendremos una convolución.

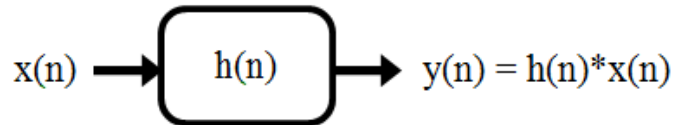


Figura 20. Función de transferencia en el dominio temporal discreto.

La información que proporciona la respuesta al impulso se usa en campos de creación de lo que se llama realidad de sonido virtual, en procesos de sonido 3D o en aplicaciones multimedia. Un dispositivo DSP puede ser usado para procesar cualquier información digital previamente almacenada. De manera más simple, a través de dos sencillas fórmulas es posible disponer de la presión sonora que en cada uno de los oídos produce una fuente, siendo posible sintetizar señales binaurales a partir de HRTF.

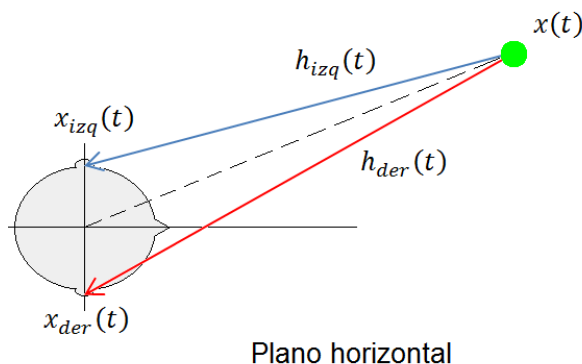


Figura 21. Representa el cálculo de las señales binaurales a partir de la señal de la fuente y las HRTF.

Las $h_{izq}(t)$ y $h_{der}(t)$ representan las HRIR, respuestas impulsivas de cada oído. A través de una fuente, $x(t)$ se obtiene las presiones $x_{izq}(t)$ y $x_{der}(t)$.

$$x_{izq}(t) = \int h_{izq}(t) \cdot x(t - \tau) d\tau \quad \text{Ec.2}$$

$$x_{der}(t) = \int h_{der}(t) \cdot x(t - \tau) d\tau \quad \text{Ec.3}$$

La respuesta al impulso puede ser reconstruida realizando la transformada inversa de Fourier a partir de la HRTF. Para un mayor entendimiento de este tipo de dato la siguiente figura muestra la HRIR medida [Merino 10] para el oído izquierdo y derecho en el plano horizontal y una elevación de $\theta=0^\circ$. La zona amarillenta representa mayor nivel y se tiene que esto se produce para ángulos cercanos a $\theta=270^\circ$ en el caso de la HRIR izquierda y para valores de azimut cercanos a $\theta=90^\circ$ en el caso de la HRIR derecha.

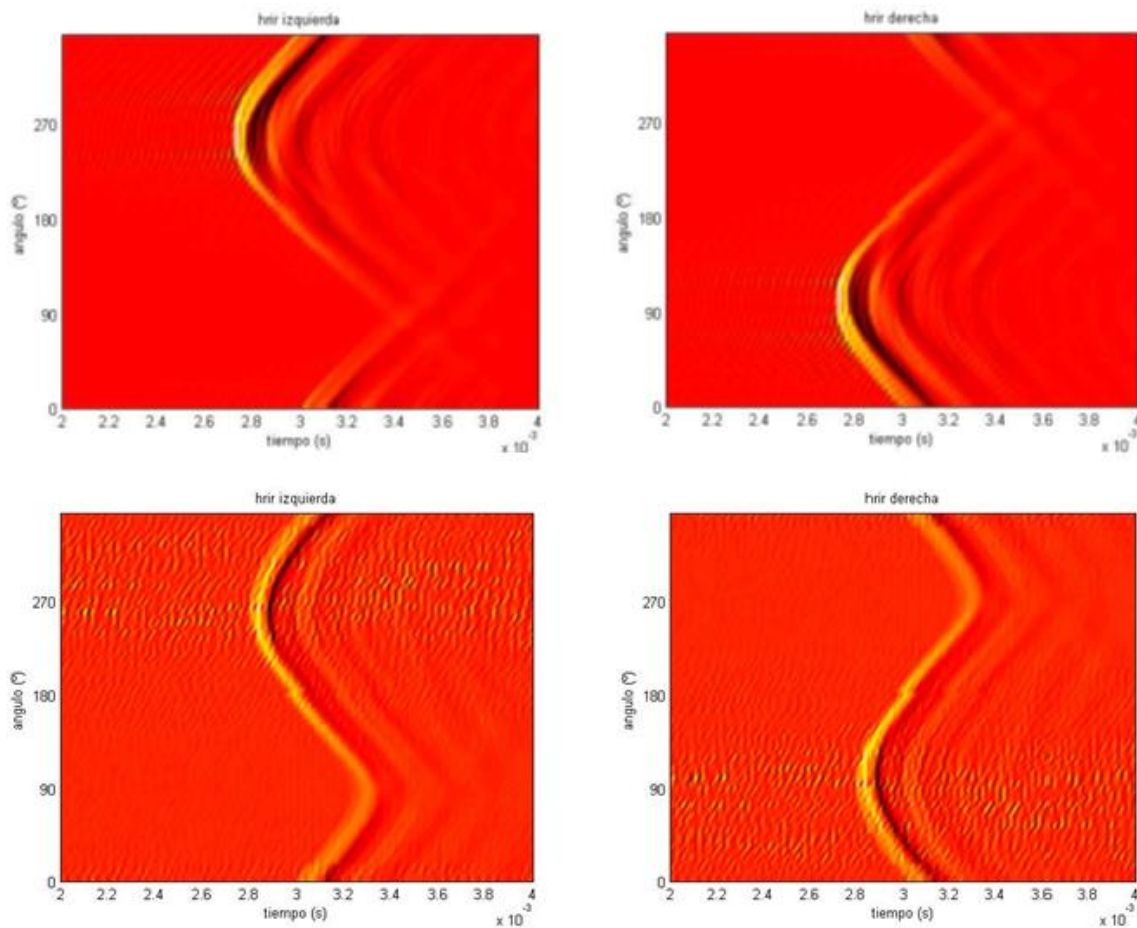


Figura 22. Representaciones de HRIR izquierda y derecha, amplitud de la señal en función del azimut y tiempo, arriba $\phi=0^\circ$ y abajo $\phi=40^\circ$.

En esta figura se comprueba las diferencias temporales de llegada en función del azimut. La HRIR izquierda presenta mayor nivel en ángulos cercanos a $\theta=270^\circ$, es donde la fuente puede establecer una señal directa siendo el nivel mucho más débil cuando se carece de ella. Lo mismo ocurre en la medida de la HRIR derecha pero en ángulos próximos a $\theta=90^\circ$.

Las figuras anteriores representan las HRIR normalizadas a la distancia de un metro, datos de los cuales se parte para la representación en la interfaz diseñada. El método a seguir para normalizar las HRIR se reduce a la búsqueda en cada una de ellas del valor máximo. Esto se da para un azimut de 90° . La primera muestra debe alcanzar el 10% de ese valor máximo de energía, las HRIR quedan desplazadas proporcionalmente para la distancia de un metro.

La *figura 23* muestra la respuesta al impulso de los dos oídos para un azimut en concreto de $\theta=90^\circ$ en el primer caso y $\theta=270^\circ$ en el segundo, la elevación es $\varphi=0^\circ$.

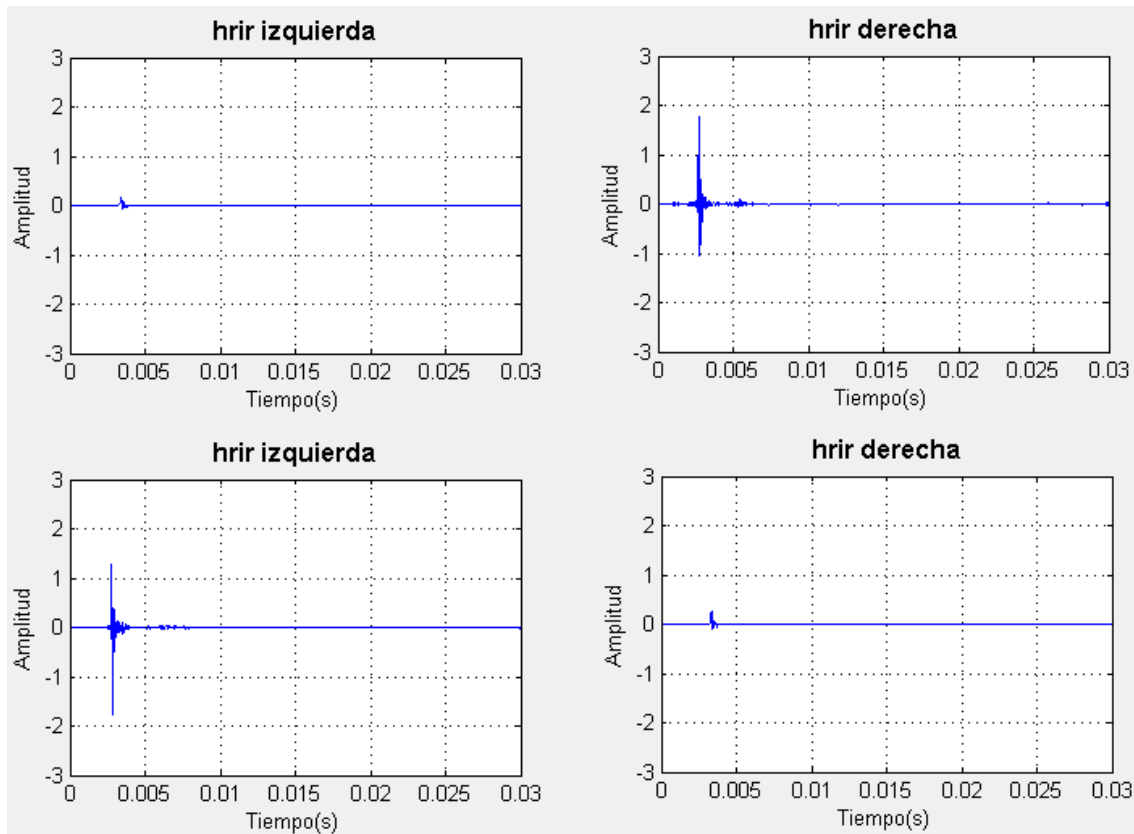


Figura 23. Gráficas de la respuesta al impulso que muestran la amplitud de la señal en función del tiempo.

En el eje de abscisas se muestra el tiempo en segundos, se comprueba que el impulso de la HRIR derecha se sitúa en los 3 ms siendo lo que tarda el sonido en recorrer un metro. Comparando la HRIR de cada oído se observa que para puntos situados en lugares donde las condiciones de llegada sean la misma se recibirán respuestas prácticamente idénticas. Estos puntos son simétricos en el plano horizontal estableciendo como origen de simetría el plano frontal. Por el contrario, los ángulos más opuestos entre cada oído se tomarán en los ángulos $\theta=90^\circ$ y $\theta=270^\circ$ de azimut.

3.4. ITD / ILD

Son los parámetros de localización espacial, las diferencias interaurales de tiempo (ITD) y nivel (ILD) son importantísimos para realizar la localización de la fuente de sonido [Blauert 97]. A la hora de obtener estos parámetros es necesario partir de las HRIR ya que en ellas se tiene la información de tiempo y nivel para cada valor de azimuth. Simplemente debemos tomarlas e ir realizando cada diferencia para cada ángulo de azimuth. Después de este proceso obtendremos los datos que se representan en la siguiente figura.

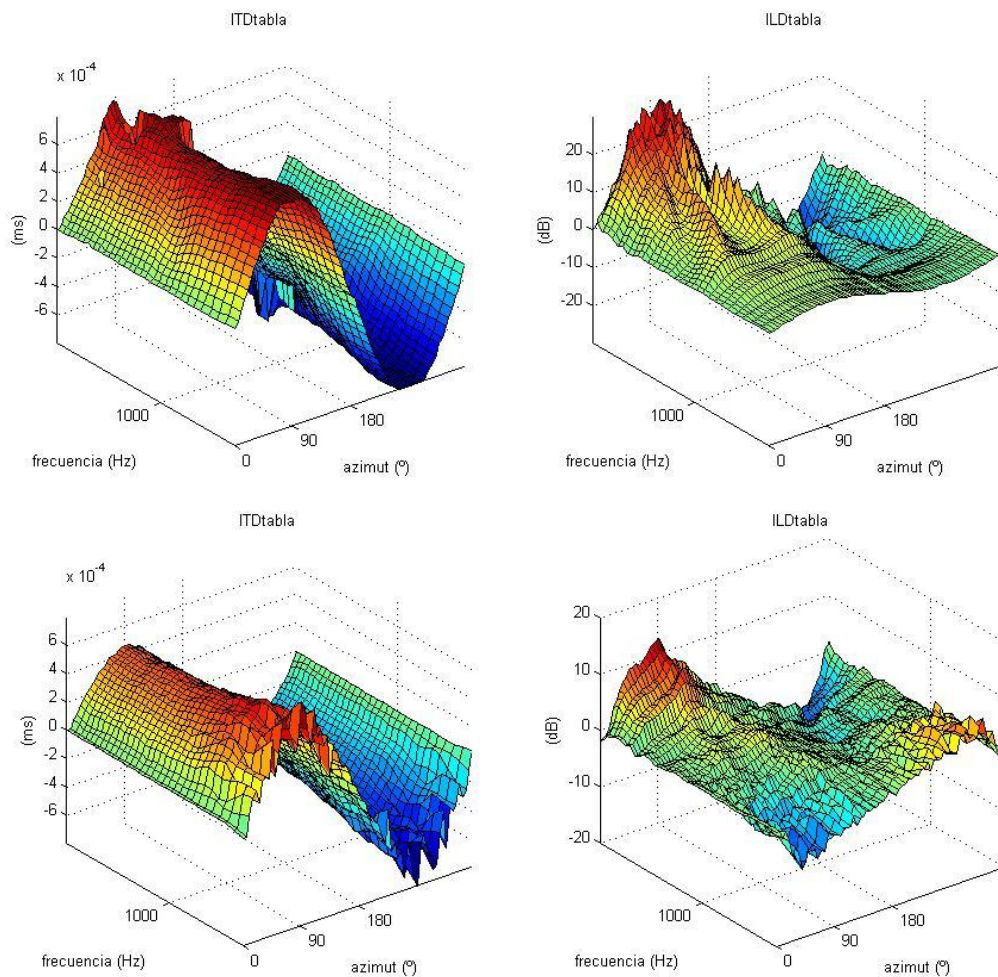


Figura 24. Diferencias interaurales de tiempo y nivel, representación en función del azimuth y la frecuencia en ms o dB, respectivamente.

Las gráfica mostrada más arriba corresponde a una elevación de $\varphi=0^\circ$, la de abajo concierne a la elevación de $\varphi=40^\circ$. Las figuras que se colocan en el lado de la izquierda son las tablas obtenidas de diferencias interaurales de tiempo. Las de la derecha son las diferencias interaurales de nivel.

Las ITD toman un valor superior a cero en puntos situados en el intervalo de $\theta=0^\circ$ hasta $\theta=180^\circ$. La diferencia del tiempo que tarda el sonido en llegar al oído izquierdo es mayor que tarda en llegar al oído derecho. Se obtiene el mayor valor en $\theta=90^\circ$ y $\theta=270^\circ$. Existen picos en la representación de la ILD en frecuencias altas debidos a la presencia de la cabeza siendo las diferencias de nivel muy variadas. En frecuencias bajas ocurre lo contrario, la cabeza no influye en las diferencias de nivel.

Ya que se obtienen las ITD e ILD en función de la frecuencia es preferible llegar a valores promediados, se realiza una media en frecuencia de cada elevación que contiene la base de datos de HRTF. El resultado se muestra en la *figura 25*.

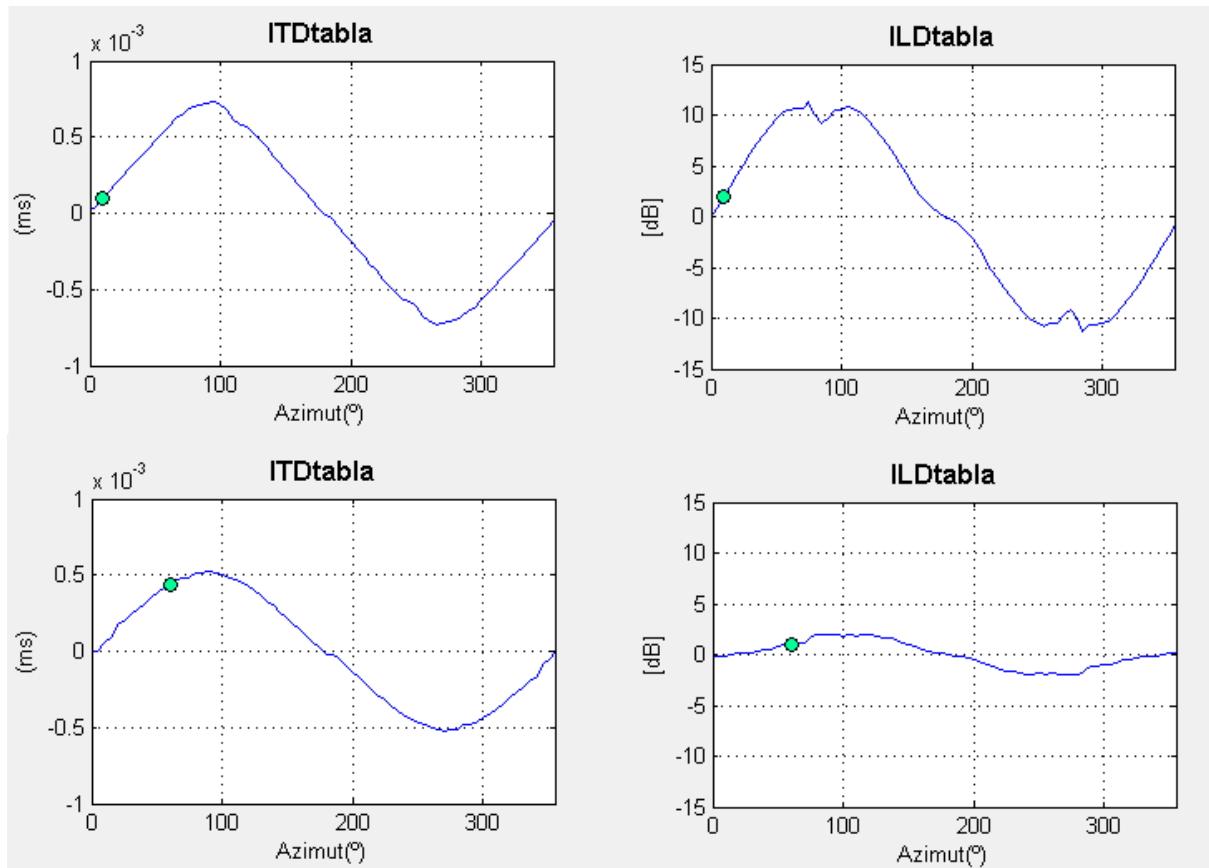


Figura 25. Gráficas de representación de ITD $\phi=0^\circ$ (izquierda) e ILD $\phi=40^\circ$ (derecha) en función del azimut.

Se muestran dos casos de elevación, la primera (las dos gráficas superiores) representan la media en frecuencia de la elevación $\phi=0^\circ$ mientras que la segunda (las gráficas inferiores) muestran gráficas para una elevación de $\phi=40^\circ$. Cada par de tablas se han extraído de las matrices que se representan en la *figura 24*. A través de la media se llega a los valores ITD e ILD demandados.

El punto verde informa al usuario del valor de azimuth introducido, representándose en la interfaz en su lugar correspondiente medidos en ms y dB respectivamente, todo ello se explicará en el capítulo 5 “Diseño de la interfaz gráfica de usuario”.

3.5. Interpolación

La base de datos HRTF es una fuente de información que se adecúa con la precisión que tiene el ser humano en la localización de la fuente sonora. Recordamos que para ángulos de elevación las medidas se tomaron con una diferencia de 10° y para valores de azimuth con una diferencia de 5° . Matemáticamente es posible la interpolación de valores intermedios de los contenidos en la base de datos HRTF. Se obteniendo así las respuestas en frecuencia, las respuestas al impulso y los valores de ITD e ILD de cualquier punto infinito que se quiera. La interpolación es totalmente válida para la comparación de base de datos como de MIT, Itakura o CIPIC.

El estudio realizado por [Hartung 99] compara el método de interpolación de la distancia inversa ponderada [Blanco Martín 09] y el método de interpolación de los “splines” esféricos. Además, otros autores sostienen la posibilidad de otro tipo de interpolación por media [Gómez-Alfageme 04]. De entre los métodos enunciados para la interpolación y creyendo que es la mejor opción, se ha optado por el método de la interpolación de la distancia inversa entre puntos.

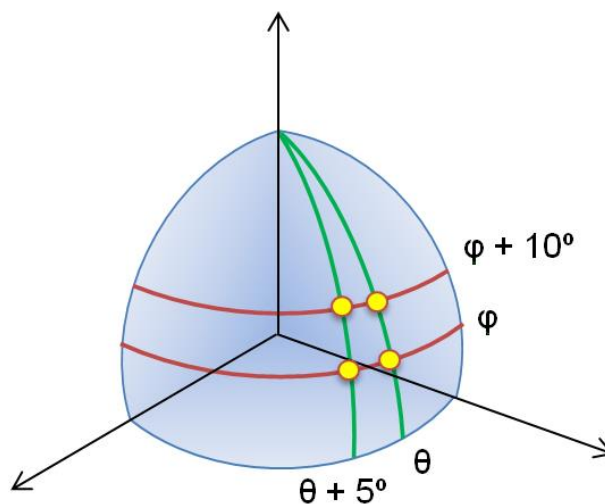


Figura 26. Representación de los puntos necesarios para realizar la interpolación.

Hay que subrayar las posibles combinaciones que nos podemos encontrar. La interpolación de dos valores de azimuth, la interpolación de dos valores de elevación o la interpolación de cuatro puntos que corresponden con los dos de azimuth y los otros dos de elevación.

Las fórmulas necesarias para la generación en valores HRTF interpolados son las siguientes.

$$d_{ij} = \cos^{-1}[\sin \varphi_i \sin \varphi_j + \cos \varphi_i \cos \varphi_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad \text{Ec.4}$$

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad \text{Ec.5}$$

$$x_j = \frac{\sum_i w_{ij} \cdot x_i}{\sum_i w_{ij}} \quad \text{Ec.6}$$

Dependiendo del número de puntos que intervienen en la interpolación (denotado con el subíndice i) se construirán los valores de distancia inversa denotados por w_{ij} . La ecuación número 6 nos da el valor correspondiente al resultado de la interpolación, x_j .

En el capítulo 8 “Implementación en MATLAB” se mostrará las funciones diseñadas en MATLAB para implementar estas fórmulas.

Además de la interpolación para obtener respuestas en frecuencia, respuestas al impulso y parámetros de localización espacial de cualquier punto en el espacio se ha tenido que emplear otro tipo de interpolación. La interpolación lineal ha sido necesaria para obtener el valor de ITD e de ILD de sus respectivas tablas previamente interpoladas.

$$x_j = f(x_1) \frac{f(x_2)-f(x_1)}{(x_2-x_1)} (x - x_1) \quad \text{Ec.7}$$

La figura que a continuación se muestra contiene los dos puntos de azimuth de la base de datos HRTF. El valor a interpolar introducido por el usuario se comprende entre estos dos puntos.

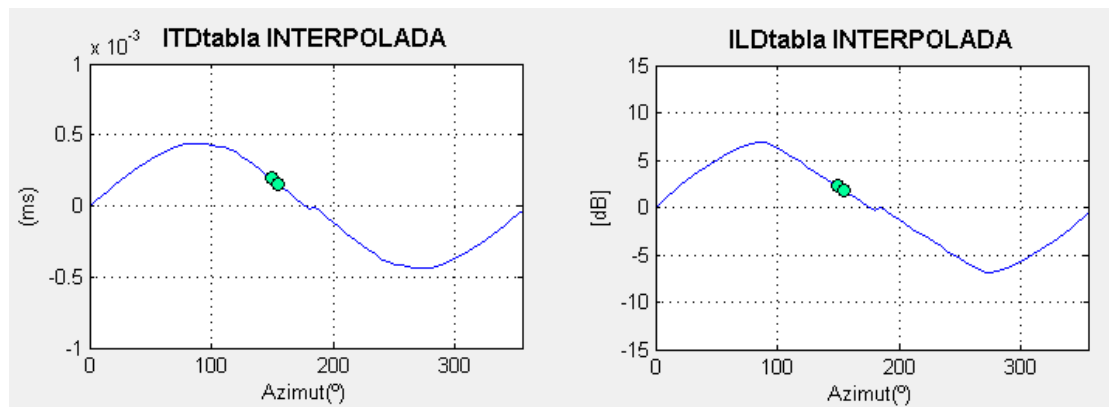


Figura 27. Representación de las tablas ITD e ILD interpoladas, contiene los límites de interpolación en el plano horizontal.

Capítulo 4. GUIDE en entorno de MATLAB

4.1 Introducción

En este apartado se dará un repaso previo a este subprograma. Está contenido en el mismo programa de MATLAB y se llamado GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Reúne las cualidades ideales para la creación interfaces gráficas de usuario llamadas GUI (Graphical User Interface). Antes de avanzar es necesario que el lector conozca su naturaleza.

La interfaz gráfica de usuario surge como evolución de la línea de comandos de los primeros sistemas operativos y es pieza fundamental del entorno gráfico. Su principal función es la interacción con el usuario mediante información digital a través de un entorno gráfico, el cual debe estar construido por componentes o elementos que ejecutan las acciones que el usuario necesita. Habitualmente se identifica mediante elementos funcionales como menús, barras de navegación, iconos, botones, textos, imágenes, etc. Existen otros métodos de comunicación entre máquina y usuario, como la interacción alfanumérica o táctil.

A continuación se explican las características y los conceptos más relevantes para el uso de GUIDE, pudiendo así realizar una GUI en entorno de MATLAB.

4.2 Creación de una GUI

Este apartado abarca la descripción de la creación de una interfaz gráfica de usuario mediante programación en MATLAB.

GUIDE proporciona herramientas para el diseño de interfaces gráficas de usuario para aplicaciones personales. Desde la ventana de comando de MATLAB se puede acceder a una nueva GUI como muestra la figura posterior.

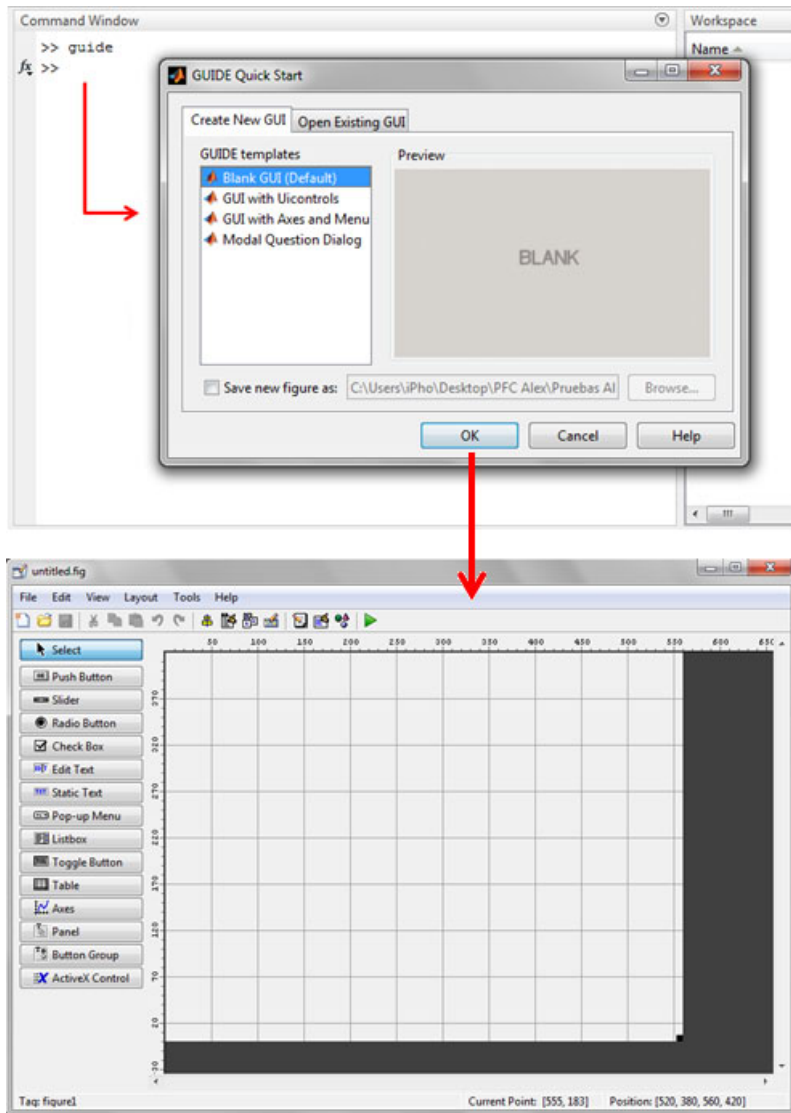
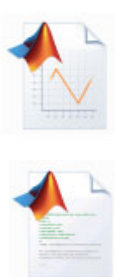


Figura 28. Muestra el proceso necesario para la apertura del editor de diseño de GUIs.

En la figura 28 se observar el posible acceso a plantillas ya prediseñadas, pulsando aceptar se llega a la pantalla principal del programa que a continuación se describe.

Por defecto se crean dos archivos al crear una GUI:



- 1) Archivo .fig: Es un archivo binario, contiene la descripción completa del diseño de la GUI y sus componentes.
- 2) Archivo .mat: Es un archivo de texto, contiene el código de inicialización y plantillas para la codificación de funciones “callback” que controlan el comportamiento de la GUI. Dado que es un archivo constituido por funciones nunca puede ser un script.



Figura 29. Listado de componentes de una GUI en MATLAB.

La figura anterior dispone el set de herramientas que simplifican el proceso de diseño y de programación a la hora de realizar una GUI. La forma en que el usuario puede introducir componentes es muy sencilla, arrastrando con el cursor desde la paleta de componentes (figura 30), se puede implementar en la “ventana figura” objetos como ejes, botones, paneles, campos de texto estático o dinámico, etc. Desde el editor de diseño se puede ajustar el tamaño y alinear cada componente el cual será controlado por el usuario.

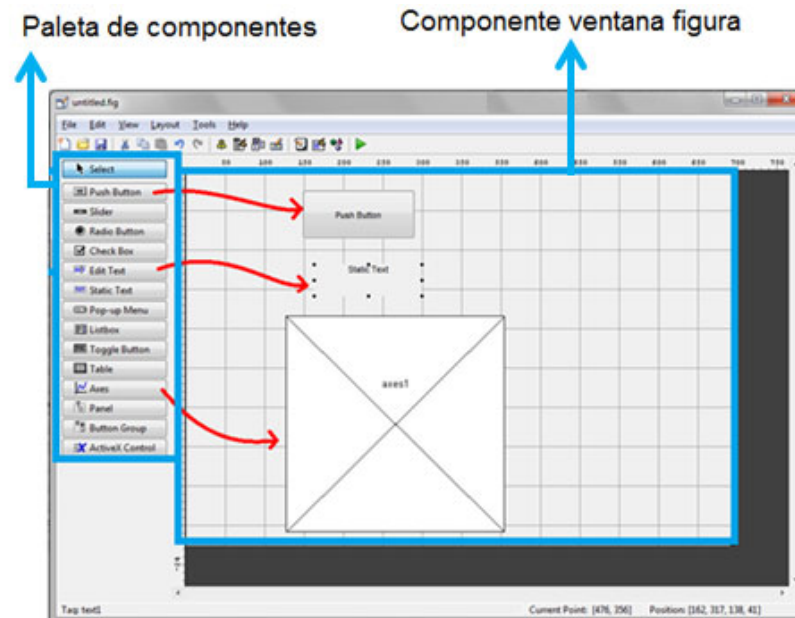


Figura 30. Imagen que representa la ventana principal del GUI.

En la figura 30 se puede visualizar la ventana principal el programa además la disposición de componentes como ejemplo. Se ha creado un botón, un texto estático y un eje para representar gráficas o imágenes, el usuario puede conformar la interfaz a su gusto.

Cada componente tiene sus propias características que son totalmente editables. Haciendo doble click en cualquier componente se muestra el inspector de propiedades que cada uno posee (figura 31). De esta forma se accede a propiedades como el nombrado (tag), de disponibilidad (enable), de visibilidad (visible), de control, de representación de datos, de posición y además de propiedades de estilo y apariencia.

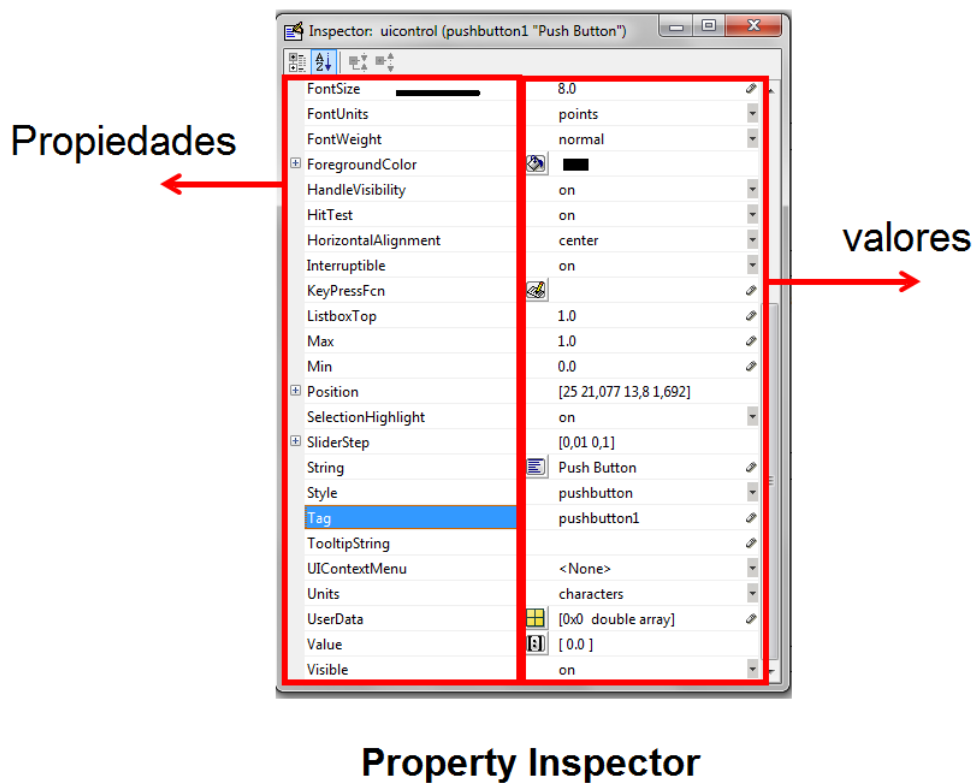


Figura 31. El inspector de propiedades agrupa características modificables de cada componente.

Como se ha comentado anteriormente el programa GUIDE genera automáticamente un archivo de programa .m que contiene las funciones de MATLAB que controla el funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario. En él se puede identificar:

- Comentarios predefinidos por la GUI.
- Función de apertura (OpeningFcn), realiza tareas de inicialización antes de que el usuario tenga acceso a la GUI.
- Función de salida (OutputFcn), retorna salidas a la línea de comando de MATLAB después de que la función de apertura retorna el control y antes de que el control retorne a la línea de comandos.

- Funciones callback de los componentes y de la ventana figura, controlan su comportamiento. Un callback es invocado en respuesta a un evento particular de un componente (keystrokes).

A continuación se muestra cómo es el código de manera esquemática, contiene las funciones en las que se basa el programa para funcionar.

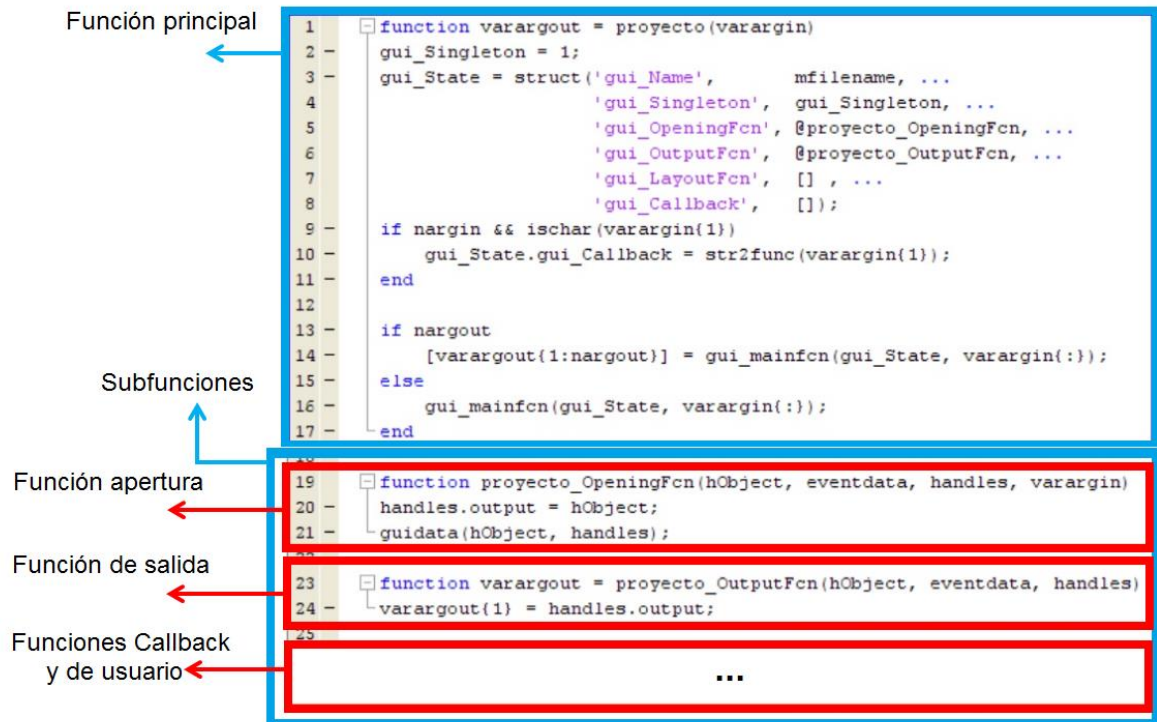


Figura 32. Estructura del código que controla las funciones de la interfaz gráfica de usuario.

Además de estas funciones propias de cada componente del programa, en el archivo de código se puede implementar cualquier otro código de MATLAB con otras funciones. En la GUI se puede ejecutar cualquier rutina añadida (“Funciones de usuario” en la figura 32). Las funciones de callback hacen que el estilo de programación en GUIDE sea estructurado, orientado a componentes y conducido por eventos desencadenados sobre algún componente de la aplicación.

Todas estas funciones tienen tres tipos de datos como argumento de entrada estándar.

- **hObject**: El primer argumento es el identificador del componente creado, se usa para obtener las propiedades relevantes que la función “callback” usa y cambiarlas si es necesario.
- **eventdata**: Son datos en forma de flujo que describe gestos del usuario, tales como pulsaciones de teclas, movimientos de rueda de desplazamiento. Las funciones callback pueden acceder a datos eventdata para controlar gráficos.
- **handles**: Al crear una GUI, ésta crea una estructura de control que contiene todos los objetos en la ventana figura (zona de diseño). Para acceder a cada objeto se utiliza la sintaxis: handles.nombre_objeto.

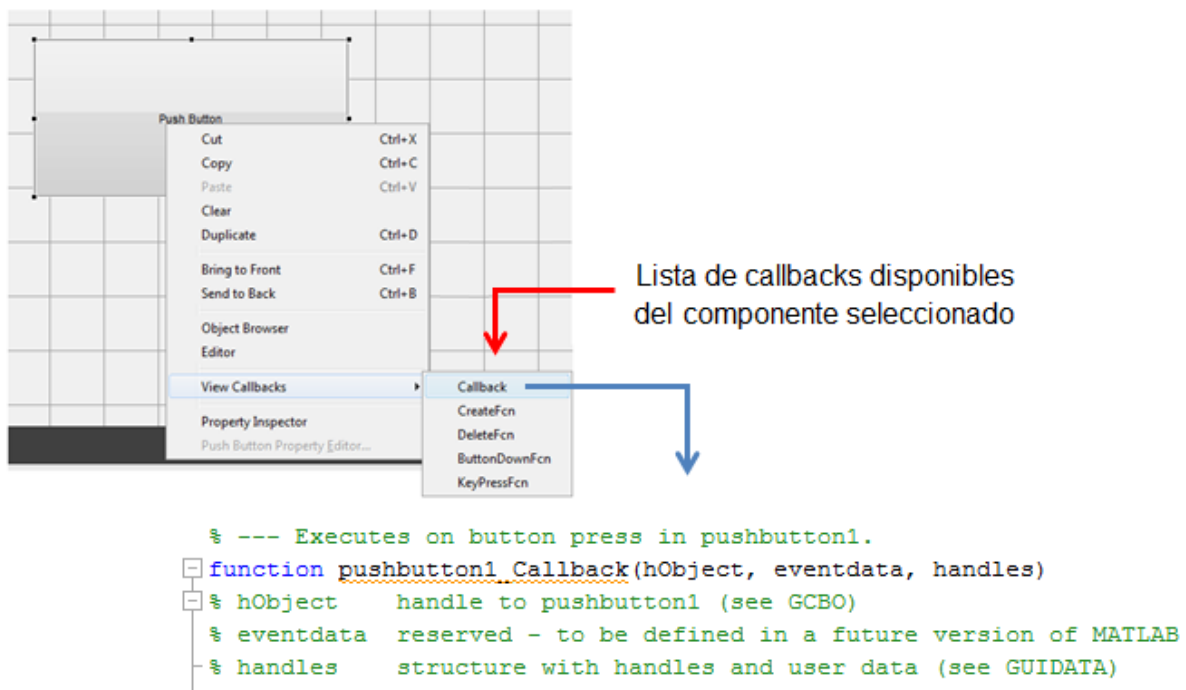


Figura 33. Camino de acceso y creación de las funciones que controlan el componente.

En la figura anterior se pretende representar visualmente qué pasos hay que seguir para la creación de las funciones de control del componente. Dependiendo de las características del componente tendrá más o menos funciones de ejecución como se puede observar en el desplegable. Además del “callback”, se tiene “CreateFcn”, “DeleteFcn”, “ButtonDownFcn” o “KeyPressFcn” que están orientadas a funciones que su nombre indica.

El interfaz diseñado, motivo del presente proyecto fin de carrera, comenzó siendo un pequeño boceto hasta convertirse en el programa que representa la *figura 34*. Se aprecia el aspecto del archivo llamado PFC_AlejandroMD.fig con los componentes que se han elegido para cumplir con las expectativas así como la idea que se tuvo en un principio de la interfaz.

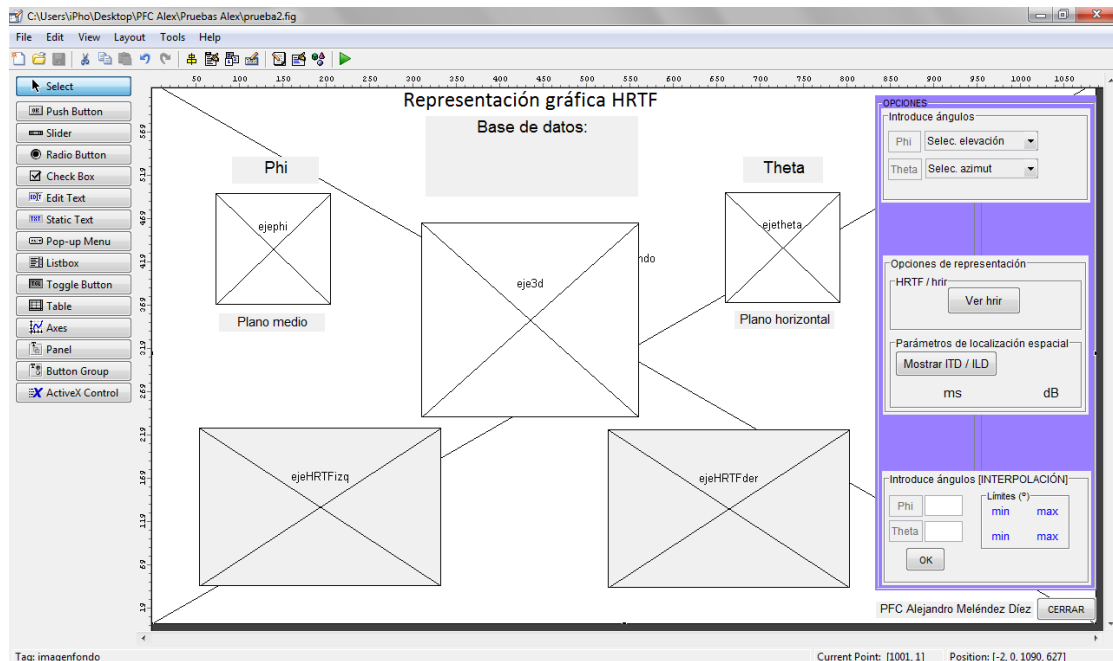


Figura 34. Resultado final de la apariencia y de la disposición de componentes en la interfaz diseñada.

En el apartado “5.2.2 “Componentes de diseño” dentro del capítulo 5 “Diseño de la interfaz gráfica de usuario” se realizará una descripción detallada de los componentes usados para las funciones de la interfaz que la figura anterior muestra.

Capítulo 5. Diseño de la interfaz gráfica de usuario

5.1 Introducción y filosofía

Esta sección centra la atención sobre la descripción propia de la interfaz.

Todo usuario requiere un tiempo de adaptación a una interfaz, cuanto menor sea el tiempo dedicado para realizar esta acción mayor será la probabilidad de éxito. Una buena interfaz se vuelve invisible a la hora de la interacción con el usuario, éste se dará cuenta de su existencia cuando observe algún error o mal diseño quedándose perdido y sin saber cual es el siguiente paso a realizar. Por el contrario el usuario debe sentirse seguro y confiado haciendo que él mismo tenga el control total de la misma.

Desde un principio se tuvo la idea de crear una interfaz sencilla, clara, predecible y fácil de usar a la vez que práctica para el aprendizaje de manera interactiva y útil. Está destinada a la representación gráfica de base de datos, en este caso se representan base de datos HRTF con unas condiciones de medida determinadas pero se hace hincapié que el programa diseñado es totalmente adaptable a otras bases de datos a representar.

Todo diseño debe empezar por la comprensión de quienes son los usuarios de destino. Se ha considerado que el usuario tiene conocimientos de la semántica y sintaxis suficientes para comprender totalmente la información proporcionada por la interfaz. Desde el primer boceto del programa se tuvo claro su filosofía, se decidió realizar el diseño en una sola ventana que reuniera los objetos de obtención de datos como los que hacen posible la representación gráfica de las HRTF, las HRIR y los parámetros ITD e ILD interactuando con el usuario. Además aparecen ayudas como mensajes de error o de navegación, todo ello enfocado a una buena experiencia de uso de la aplicación.

5.2 Manual de usuario

En esta sección se pretende dar a conocer al usuario toda la información relevante y necesaria para el uso, el control y la comprensión de la interfaz gráfica. A medida que se avance en los siguientes apartados el usuario podrá comprender de lo que es capaz la interfaz así como los componentes de la interfaz que necesita utilizar para obtener la representación que desea.

En el apartado 5.2.2 “Componentes del diseño” se describirán de manera informativa los diferentes componentes ya que en el apartado 5.2.4 “Descripción de funciones e implementación” es donde realmente el usuario va a poder comprender en profundidad las funciones de estos componentes. Previamente a este apartado se complementa la información con la creación de un diagrama de flujo del sistema. De tal manera que antes de entender las funciones de cada componente el usuario tenga acotada la idea de la función completa de la interfaz gráfica de usuario.

De esta forma el usuario adquirirá los fundamentos necesarios para saber cómo navegar, cómo representar y qué representar, cómo pasar de un tipo de representación a otra, etc.

5.2.1 Objetivo del programa

El propósito general de la interfaz es la representación gráfica de la base de datos HRTF. Los datos representados fueron descritos en el capítulo 3 “Base de datos HRTF”. En el capítulo actual se utiliza esta información de una forma práctica debido a la necesidad de su uso para la implementación de la interfaz.

La base de datos HRTF está compuesta por archivos .mat, los cuales contienen datos de HRTF, HRIR y tablas de los parámetros de localización espacial. Cada archivo de cada tipo de dato de la base de datos HRTF contiene información (en forma de matriz) de los 72 valores de azimut medidos. El programa accede a cada columna de la matriz para la representación de un solo punto en el espacio, el cual habrá sido introducido por el usuario. De esta manera, como se mostrará más adelante, la interfaz gráfica de usuario cumple con el objetivo por el cual fue diseñada.

En el siguiente apartado se especifican los componentes por los cuales está formada la interfaz además de las características de cada uno.

5.2.2 Componentes de diseño

En el apartado actual se describen los componentes elegidos para la interfaz. Consta de una única ventana reduciendo los límites de la capacidad del programa solo con un golpe de vista. Se compone de dos áreas, están delimitan en azul en la *figura 35*. La primera está destinada a la representación de datos y la segunda consta de las opciones de representación además de la de introducción de datos por el usuario.

El usuario tiene dos opciones para introducir datos, la primera es para representar datos a partir de la base de datos HRTF (número 6), la otra opción representa datos de interpolación partiendo de la base de datos (número 7). Más adelante se describe con mayor precisión. Cada componente tiene su función siendo cada uno pieza fundamental para cumplir la idea por la cual fue creado.

A continuación se muestra un esquema de los diversos componentes que comprende la interfaz además de su descripción y propósito.

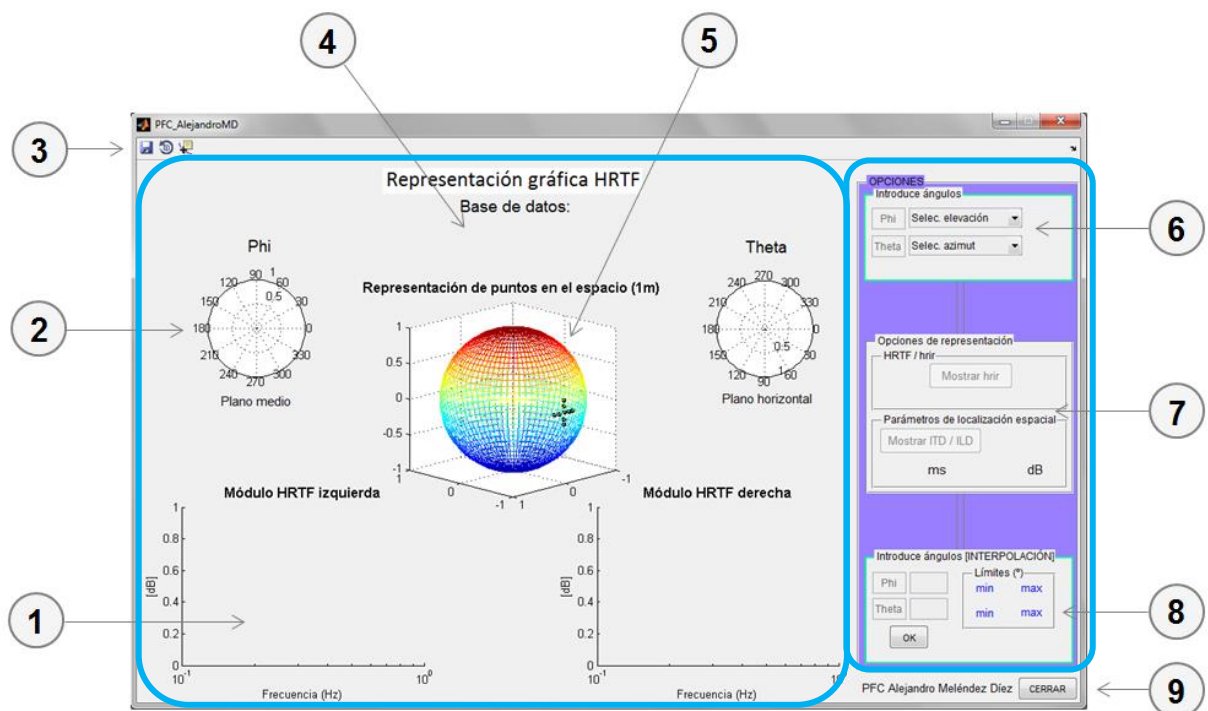


Figura 35. Apariencia principal de la interfaz gráfica de usuario.

En el apartado 5.2.4 “Descripción e implementación de funciones” se explicarán las funciones en detalle. En el apartado actual se procede únicamente a la descripción de los componentes que confeccionan la interfaz gráfica de usuario.

1

Representación gráfica HRTF, HRIR e ILD/ITD

Esta sección reúne dos ejes que son dos componentes de representación gráfica. Uno para la representación del oído izquierdo y el otro para la del oído derecho. Este grupo de componentes es el más importante ya que muestra la respuesta en frecuencia, la respuesta al impulso y las gráficas pertenecientes a las tablas de ITD e ILD. Dependiendo de qué información se muestre, los ejes de abscisas representarán frecuencia, tiempo o azimut respectivamente. El eje de ordenadas representará dB, amplitud o tiempo y dB para la representación de los parámetros de localización espacial.

Se muestra un ejemplo de cada tipo de dato representado en este componente.

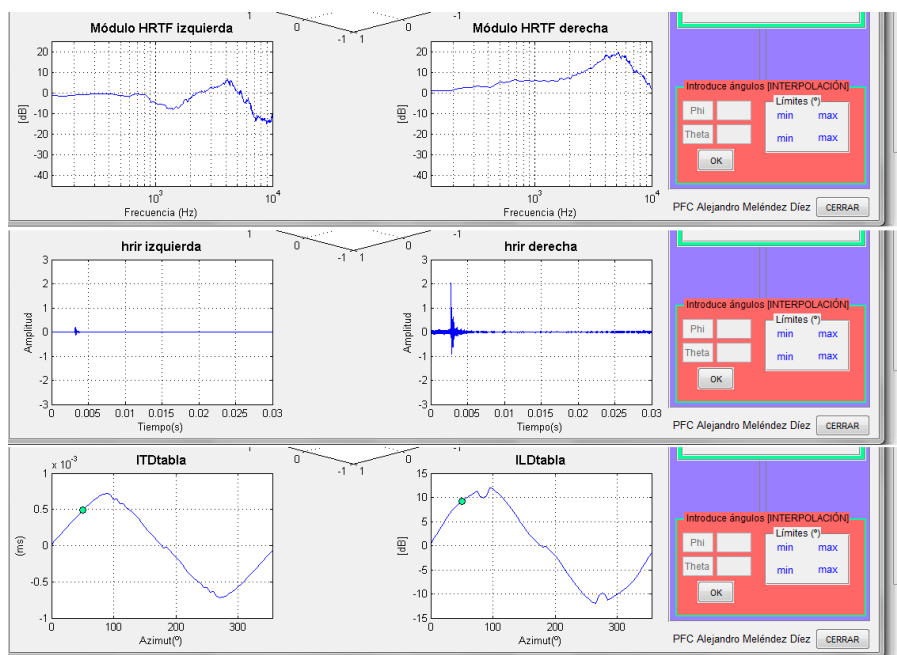


Figura 36. Dos ejes son tratados como los componentes principales de representación gráfica.

2

Representación de ángulos

Estos componentes son ejes y se utilizan para la representación de los ángulos que el usuario introduce. Se pretende que con su disposición se haga una interpretación más visual del plano medio y del plano horizontal. Haciendo que el usuario sea completamente consciente del punto que busca para representar. Seguidamente se muestra un ejemplo.

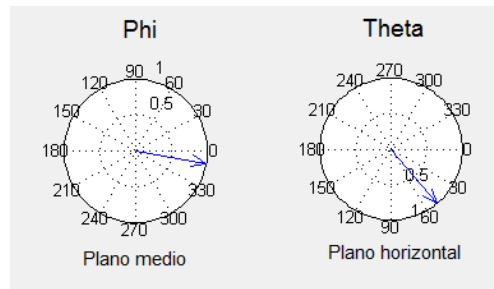





Figura 37. Componentes de representación angular, ϕ y θ .

3 Barra de herramientas

La barra de herramientas reúne una serie de opciones que se disponen y adecuan a las necesidades de representación gráfica y de guardado de imágenes.

 → Opción de „Save Figure“. Realiza un almacenamiento de representaciones gráficas. Se guardan en la carpeta actual dos archivos .jpg de lo que se muestra en los ejes de los componentes número 1.

 → Opción de „Rotate3d“. Hace posible mover el componente número 5 en tres dimensiones haciendo uso del cursor. Es de especial utilidad cuando se representan puntos donde su visibilidad es reducida.

 → Opción de „Data Cursor“. Haciendo click en cualquier punto de cualquier eje de los disponibles en la interfaz, representa los valores de ese punto que intersectan en los respectivos ejes de coordenadas.

4 Base de datos de HRTF actuales

Representa la base de datos HRTF de donde se recoge la información (archivos .mat) para la representación gráfica pertinente. Está compuesta por 4 cuadros de texto estático de los cuales tres cambian según el usuario introduzca valores de elevación y de azimuth. La siguiente figura representa dos ejemplos de recogida de información en la base de datos HRTF según elevación.

Base de datos:	Base de datos:
hrtf_elevacion-40.mat	hrtf_elevacion20.mat
hrr_ele_1m-40.mat	hrr_ele_1m20.mat
ILDITD_BK-40.mat	ILDITD_BK20.mat

Figura 38. Archivos de la base de datos de HRTF.

5

Representación espacial de los puntos

Este componente muestra el punto o los puntos que al usuario le interesan para su representación. Éstos están sobre una superficie esférica transparente coincidiendo con las coordenadas esféricas necesarias para la medida y representación de la base de datos HRTF. Se dispone de una cruz de color negro que representa la coordenada $\varphi=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$.

De los componentes gráficos o visuales existentes en la interfaz, éste es el más útil y eficaz en la orientación del punto a representar. Seguidamente se muestra en la *figura 39* puntos de representación.

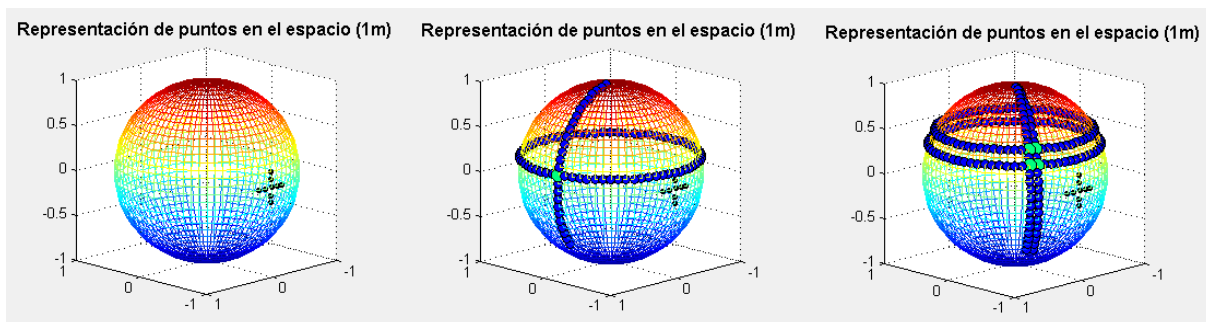


Figura 39. Representación esférica de los puntos en el espacio.

De izquierda a derecha, en el primer caso la esfera no posee ningún valor. El segundo representa el punto caracterizado por $\varphi=10^\circ$ y $\theta=80^\circ$. Y por último la esfera contiene los puntos que definen los límites de interpolación. El punto introducido a interpolar está incluido en el cuadrado que los cuatro puntos verdes delimitan.

6

Panel de introducción de ángulos de la base de datos HRTF

Este panel es el encargado de recibir los valores de elevación y de azimut (ϕ y θ) para la representación de la base de datos HRTF. Está definido por dos “pop up menu” que despliegan una lista de ángulos posibles para seleccionar. Es posible su selección mediante los cursores de teclado para mayor facilidad de navegación como indica el mensaje encabezado con un asterisco.

En la siguiente figura se muestra los posibles valores que contienen y los dos estados de representación (verde y rojo). Estos estados se describen en detalle en el apartado 5.2.4 “Descripción e implementación de funciones”.

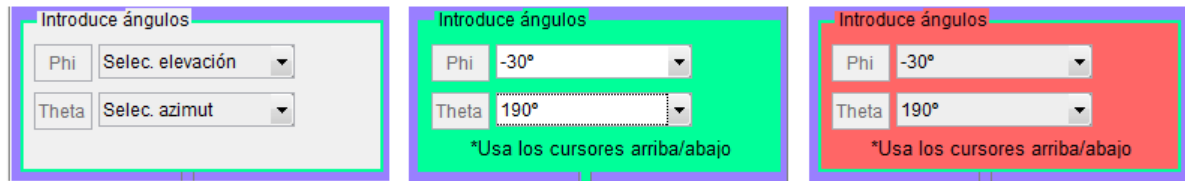


Figura 40. Panel de introducción de ángulos de la base de datos de HRTF.

7 Panel de opciones de representación

Se puede acceder a este panel para cambiar la representación que muestra los componentes número 1. Tiene dos apartados, que cada uno contiene un botón conmutador que de esta manera alterna representaciones. El primer apartado contiene el botón conmutador “Mostrar HRIR”, al pulsarlo los componentes número 1 mostraran las gráficas HRIR. Además, éste cambia de estado cambiando a “Mostrar HRTF”, pudiendo estar alternando de representaciones así como el usuario crea conveniente.

El segundo apartado se muestra la ITD y la ILD del punto seleccionado en el panel de introducción de ángulos de la base de datos HRTF. El botón “Mostrar ITD/ILD” es ligeramente diferente al anterior, representa en los componentes número 1 las gráficas de la elevación seleccionada. Al pulsarlo otra vez, representa la gráfica que estuvo antes mostrándose.

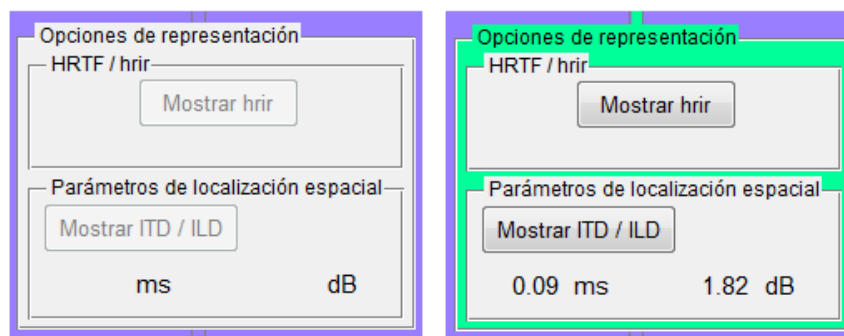


Figura 41. Panel de opciones de representación.

8 Panel de introducción de datos de interpolación

Este panel contiene los componentes necesarios para la introducción de ángulos para interpolar y también muestra los límites de phi y theta dependiendo del valor introducido. En la figura siguiente se muestra el aspecto que presenta el panel en base al estado de representación de la interfaz gráfica de usuario.

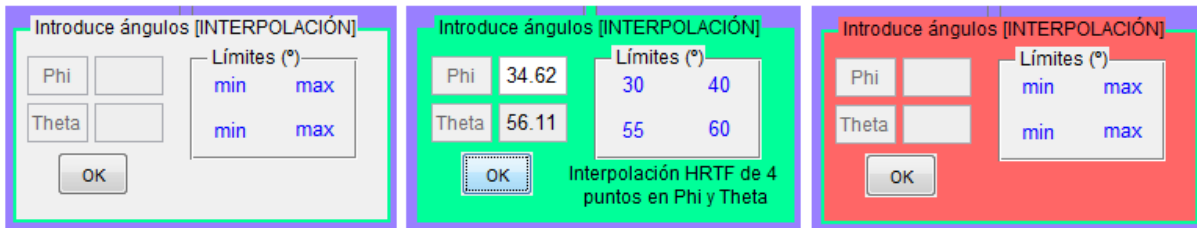


Figura 42. Panel de introducción de datos de interpolación.

9




Salir del programa

Es el componente que ejecuta la acción de salir del programa.

5.2.3 Diagrama de flujo

En esta sección se representa la esquematización gráfica del programa. Un diagrama de flujo que muestra gráficamente los posibles pasos del usuario y su consecuente efecto de ejecución en la interfaz.

Un diagrama de flujo se define como una red de procesos funcionales conectados entre sí. Se construye sobre éste el algoritmo mediante el lenguaje de programación, en este caso se trata de MATLAB. Debido a que un diagrama de flujo muestra los aspectos determinantes en el uso de la interfaz, se ha definido una simbología y metodología particular con el objetivo de una correcta simplificación a la hora de la interpretación del funcionamiento del programa. Se procede a describir de forma clara y concisa los aspectos a tener en cuenta:

- 1)  → **Acciones del usuario.** Introducción de datos y pulsar botones.
- 2)  → **Estados de representación.** Dependiendo de qué botón pulse el usuario los estados de representación cambiarán.
- 3)  → **Respuesta de representación.** Dependiendo de las acciones del usuario el programa realizará una acción u otra. Acción reversible.

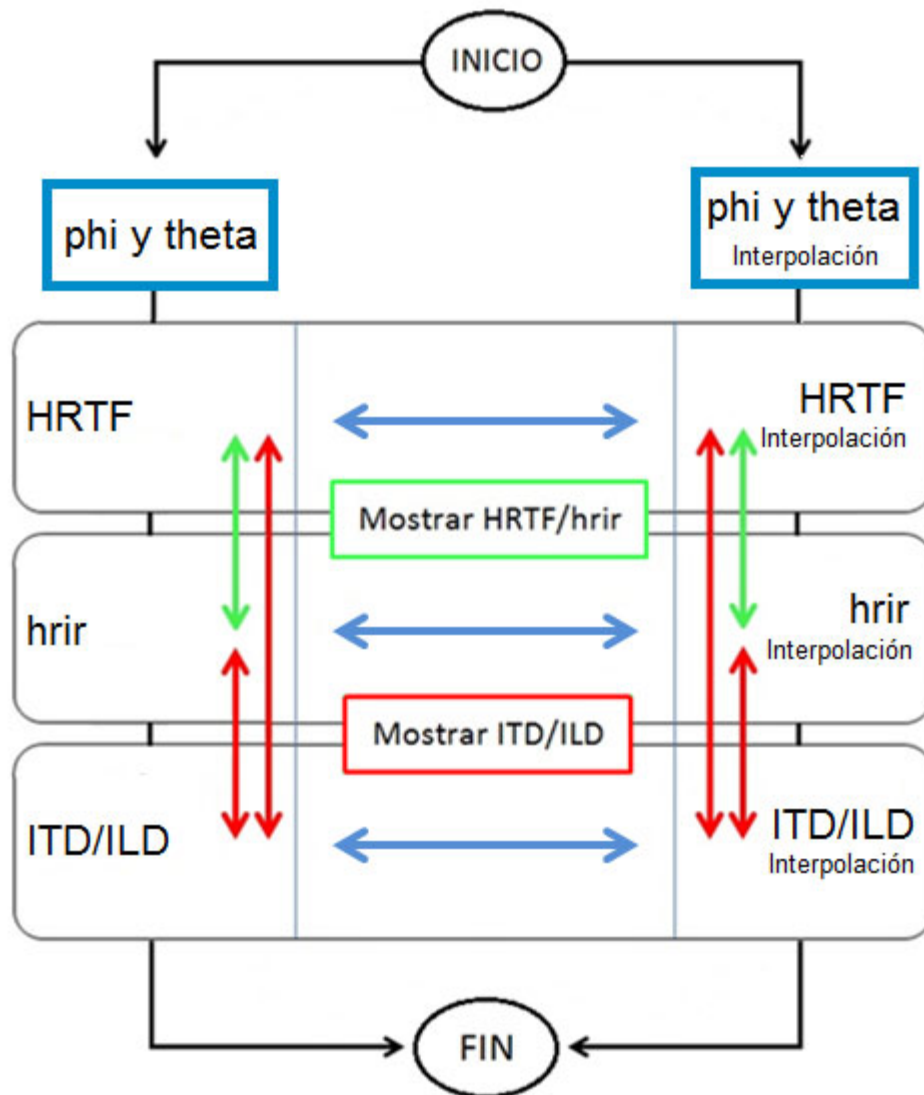


Figura 43. Diagrama de flujo de la GUI, sintetiza los estados, las funciones y las acciones principales.

Se comienza iniciando el programa donde la situación se sitúa en “INICIO”. El usuario en este momento puede introducir los datos, es decir, phi y theta para representar los ángulos contenidos en la base de datos HRTF o para representar ángulos que deberán ser interpolados.

Pasado este proceso, por defecto el usuario se sitúa en la representación HRTF. Momento en el cual puede acceder a pulsar “Mostrar HRTF/HRIR” o “Mostrar ITD/ILD”. Al ser botones conmutadores hacen posible la alternancia de estados de representación, la reacción de la interfaz genera las representaciones gráficas pertinentes.

Se ha usado el color verde para definir alternancias en estados de HRTF - HRIR y el color rojo para alternancias entre HRTF - ITD/ILD y HRIR - ITD/ILD. Hay que tener en cuenta estos procesos son reversibles, de ahí que se haya decidido diseñar flechas de doble sentido (figura 43). Éstas, de color azul, no representan ningún estado, solo y exclusivamente la posible alternancia entre los valores a representar.

5.2.4 Descripción de funciones e implementación

Ya que el presente proyecto fin de carrera muestra el diseño de la interfaz gráfica de usuario, se ha creído conveniente la profunda descripción de las funciones que en la sección anterior se ha descrito rasamente. Se procede a explicar y comentar los puntos más importantes del programa así como sus posibilidades de ejecución para todo tipo de estados y movimientos que el usuario pueda combinar. Ya que el lector está familiarizado con los componentes de la interfaz se considera un desarrollo más avanzado en este apartado.

Se comienza con la ejecución del programa como muestra la *figura 44*. En este punto el usuario tiene la opción de introducir datos de dos formas posibles dependiendo del objetivo que desee.

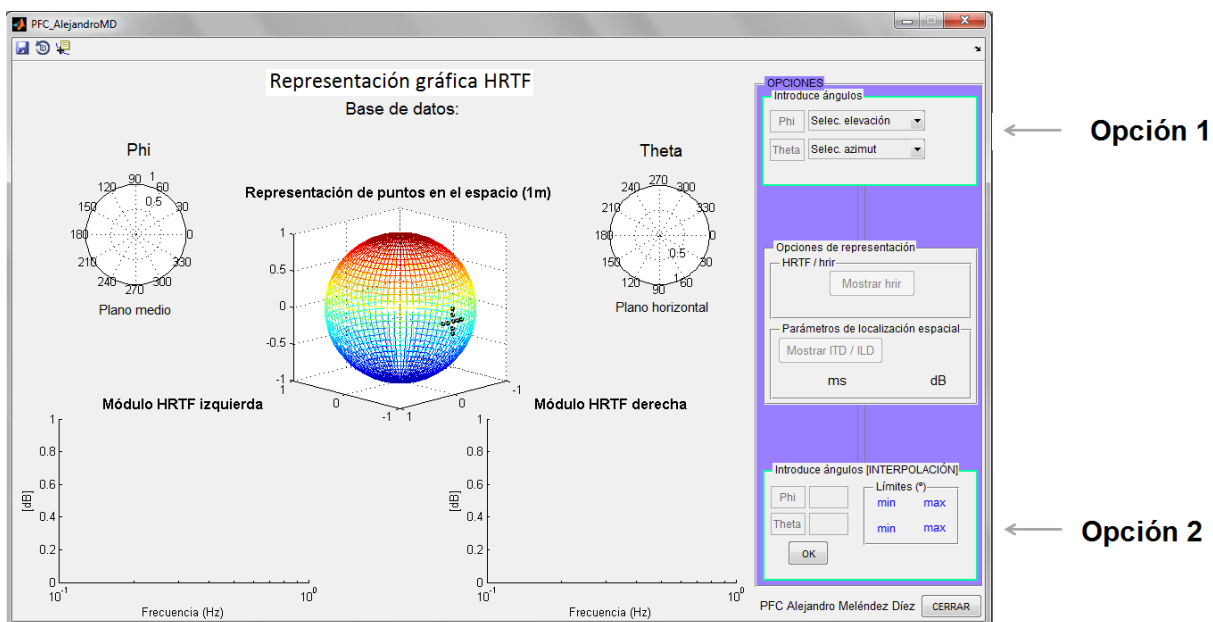


Figura 44. Estado principal de la interfaz, se presentan dos opciones de introducción

Comenzamos con la opción 1. Indica la manera de introducir los valores de elevación y azimuth (phi y theta) ya definidos por la base de datos de HRTF. Se despliega una lista de ángulos disponibles para los dos valores.

Con la intención de la una mejor comprensión de este aspecto del programa se van a representar tres ejemplos de selección de valores de elevación y azimuth. Tendremos tres ejemplos de representación de respuesta en frecuencia HRTF.

Empezaremos a describir la introducción del valor phi en la opción 1.

5.2.4.1 Introducción de datos

→ Opción 1

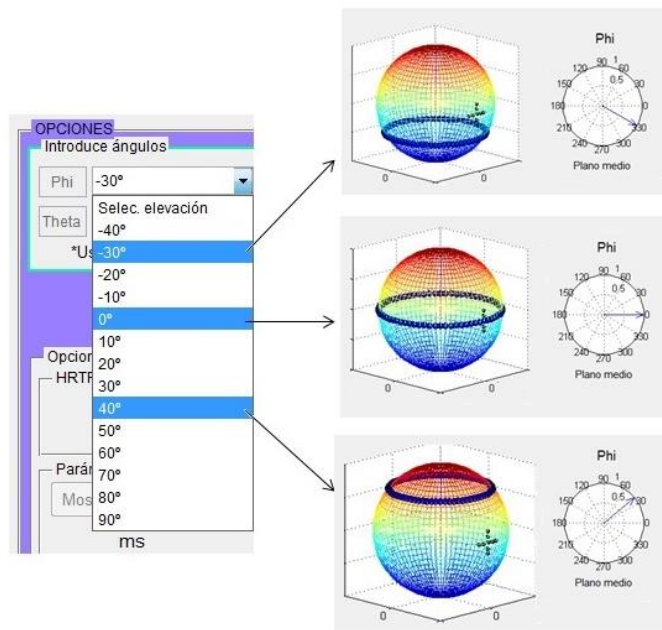


Figura 45. Opción numero 1 para la introducción de ángulos de phi.

Se puede comenzar con la selección de phi o theta según quiera el usuario. En esta explicación se comenzará primero con phi y después con theta.

La figura 45 muestra las posibles selecciones de elevación y su consecuente representación espacial de puntos. Se ha optado por la representación de puntos en el plano horizontal para ayudar al usuario a la elección de la elevación. Además se tiene otra forma de representación que la del plano medio mediante una representación angular como se muestra en la figura 45 a la derecha de la esfera. La resolución angular que nos brinda la base de datos HRTF en el plano medio es de $\pm 10^\circ$, teniendo en esta, información de elevaciones desde $\phi = -40^\circ$ hasta $\phi = 90^\circ$.

Hacer hincapié en que la interfaz es capaz de representar cada valor de elevación introducido, representándolo cada uno en la esfera en el momento de su elección, pudiendo estar alternando los valores cuantas veces se desee.

Continuamos ahora con la selección de theta en la opción 1.

En la figura siguiente (figura 46), muestra la ejecución de la interfaz gráfica para tres valores de elevación introducidos, es posible su elección generando una alternancia de representación de valores introducidos por el usuario.

Como se puede observar se tienen muchos más valores a elegir separados cada 10° . Se han escogido estos valores de theta siendo consciente que la base de datos HRTF posee una resolución en azimuth de 5° . La explicación no es más que por una cuestión de diseñar una interfaz práctica y no mostrar una lista enorme de valores.

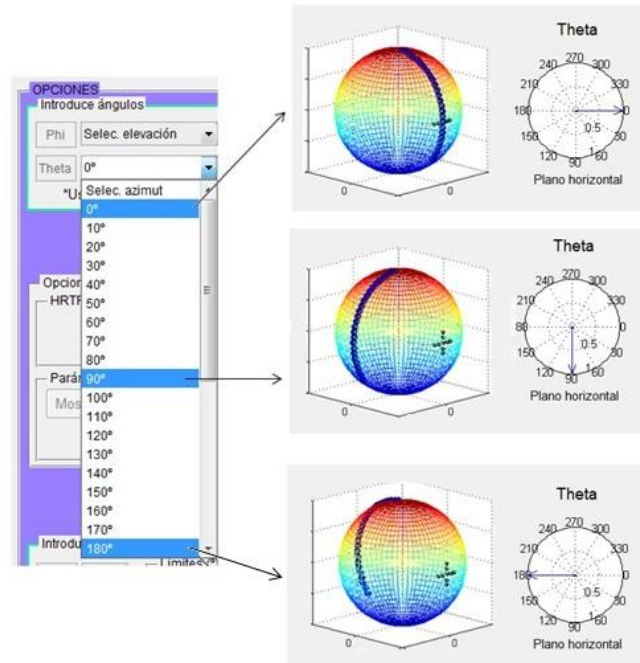


Figura 46. Opción numero 1 para la introducción de ángulos de theta.

Se ha escogido la representación espacial de puntos en el plano medio para que el usuario tenga una mejor visión de los ángulos en el plano horizontal a elegir. Al igual que el caso anterior de phi, la interfaz muestra una gráfica de ángulos que hacen más entendible el valor seleccionado. Lógicamente los valores de theta abarcan desde $\theta=0^\circ$ hasta 360° .

Llegados a esta situación hay que tener en cuenta que para las dos combinaciones posibles, es decir, introduciendo primero phi y luego theta o viceversa, la interfaz procede a la representación espacial del punto en concreto, además de la pertinente representación de la respuesta en frecuencia del punto seleccionado.

En la figura siguiente se muestra la representación espacial del punto seleccionado y definido por phi y theta de los tres casos propuestos como ejemplo.

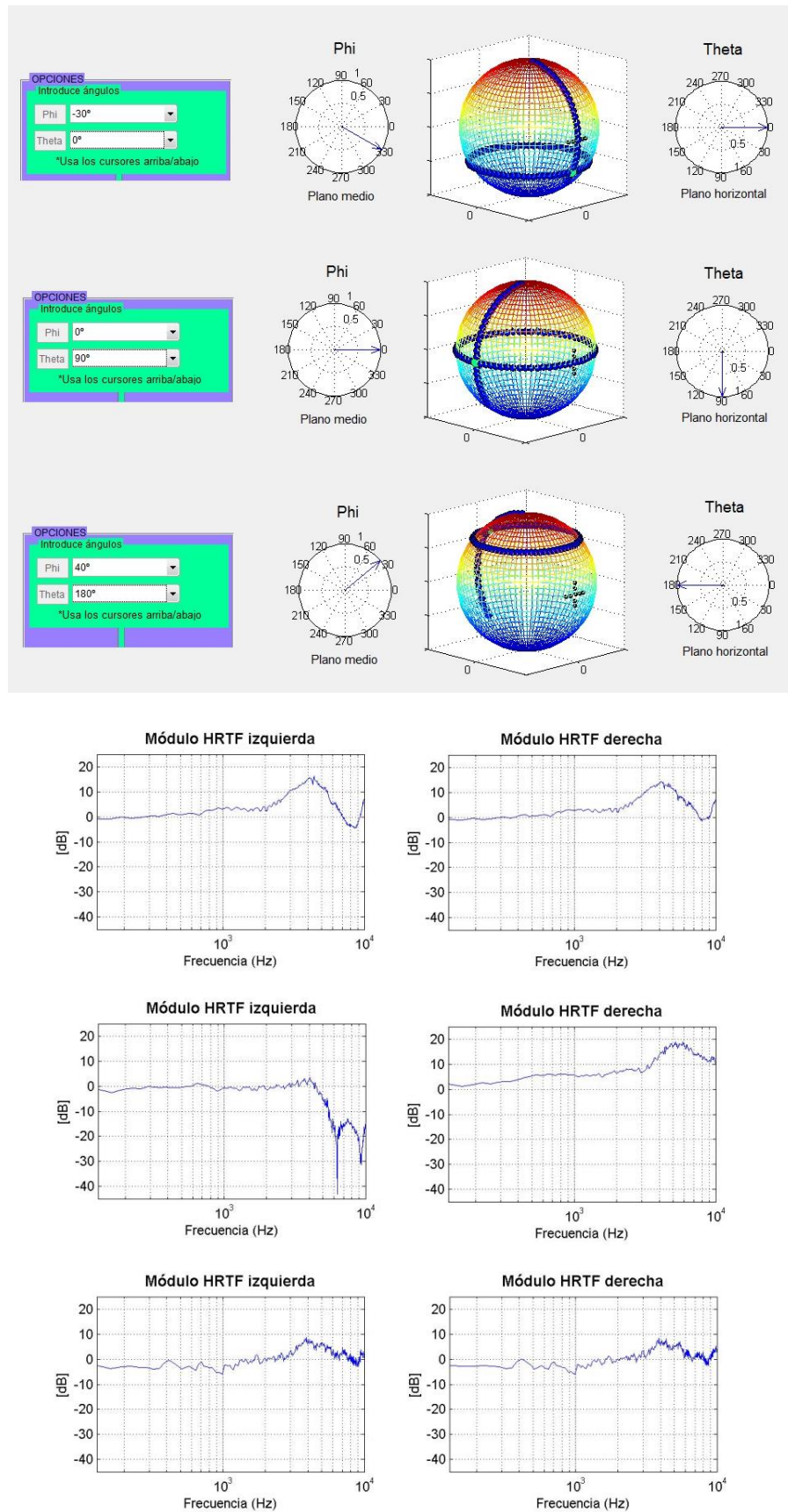


Figura 47. Muestra la representación de la GUI de los puntos introducidos en los tres ejemplos.

Los puntos seleccionados se representan con el color verde sobre la esfera. Para el tercer caso, este punto se ve con dificultad pero para ello se dispone en la barra de herramientas la opción de “Rotate 3d”, de esta manera se puede manipular la esfera en la dirección y sentido que el usuario desee para una buena visión del punto en cuestión. En la *figura 47* se muestra también la representación HRTF de la respuesta en frecuencia tanto del oído izquierdo como del oído derecho.

A modo de comentario y de análisis de la figura se puede observar que para tanto para el primer ejemplo y tercero se tiene un ángulo theta de $\theta=0^\circ$ y $\theta=180^\circ$ respectivamente. Haciendo que la respuesta en frecuencia entre los dos oídos en cada caso se ha bastante similar. En el segundo ejemplo tenemos el caso más radical del filtrado que realiza la cabeza, teniendo en la respuesta en frecuencia del oído izquierdo una atenuación en frecuencias altas.

El aspecto visual en la situación planteada con la opción 1 es la siguiente.

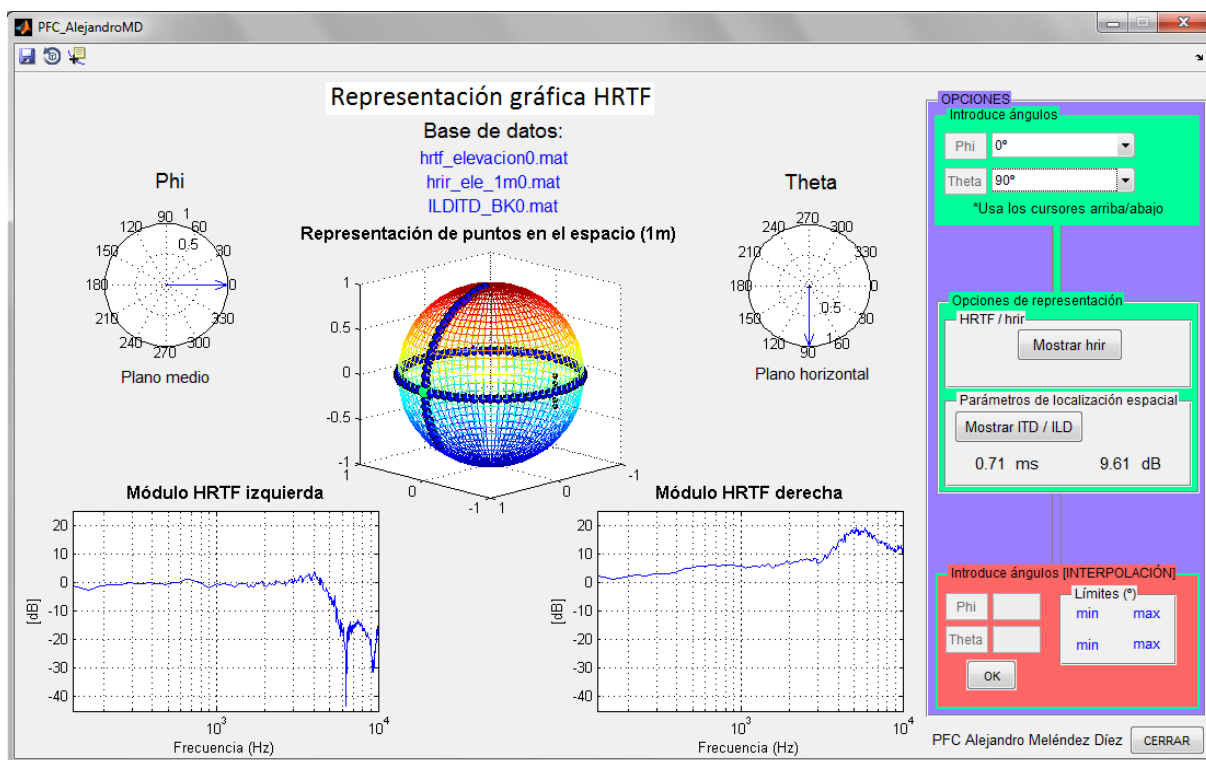


Figura 48. Aspecto final en la representación de puntos contenidos en la base de datos de HRTF.

Más adelante se comentará el porqué de los colores. Debajo del título “Representación gráfica HRTF” se puede visualizar la base de datos requerida para la representación.

→ Opción 2

La opción 2 es la introducción de datos para que se lleve a cabo la interpolación, es decir, valores intermedios de phi y theta que no sean los que aparecen en la opción 1. Es la vía adecuada para la representación de respuestas en frecuencia HRTF, respuestas al impulso (HRIR), o las tablas de los parámetros espaciales (ITD e ILD) siendo los datos interpolados.

The figure shows four examples of the data input interface for HRTF interpolation. Each window has a title bar 'Introduce ángulos [INTERPOLACIÓN]' and contains the following elements:

- Phi input:** A text box for the azimuth angle.
- Theta input:** A text box for the elevation angle.
- Límites (°) sub-panel:** A box containing two columns of limit values. The left column represents the lower limit and the right column represents the upper limit.
- OK button:** A button to confirm the input.
- Description:** A text label at the bottom of the window indicating the type of interpolation.

The four examples are as follows:

Phi (°)	Theta (°)	Lower Limit (°)	Upper Limit (°)	Description
34.6	78.2	30	40	Interpolación HRTF de 4 puntos en Phi y Theta
40	47.9	40	50	Interpolación HRTF de 2 puntos en Theta
23.8	220	20	220	Interpolación HRTF de 2 puntos en Phi
-30	245	-30	245	Sin interpolación HRTF

Figura 49. Cuatro ejemplos de introducción de datos para realizar la interpolación.

También es posible la introducción de datos que no necesitan ser interpolados (Figura 49 cuarto caso). La interfaz los reconoce y recurre a la representación gráfica de datos como si en la opción 1 estuviera.

En la figura anterior se representa cuatro ejemplos de introducción de datos para interpolar. Cada uno de ellos con diferencias importantes para llevar a cabo la interpolación. Después de introducir datos intermedios, el usuario debe pulsar el botón “OK”. El panel muestra la necesidad de conocer qué datos contiene la base de datos HRTF y que necesitas disponer el programa para realizar la interpolación. Por ello, existe un sub-panel llamado “Límites”, representando los valores en grados de los límites inferior (izquierda) y superior (derecha) del valor introducido.

En el caso primero (arriba a la izquierda) un valor de $\phi=34.6^\circ$, los límites contenidos en la base de datos HRTF, son $\phi=30^\circ$ y $\phi=40^\circ$ puesto que la resolución en elevación es de $\pm 10^\circ$. Y para un valor de $\theta=78.2^\circ$, los límites son $\theta=75^\circ$ y $\theta=80^\circ$ ya que la resolución en azimuth es de

$\pm 5^\circ$. Con lo cual, en este caso el programa debe realizar una interpolación de cuatro puntos como se muestra como mensaje en el panel.

Es importante conocer qué ocurre cuando se introducen otros datos que coinciden con los datos almacenados en la base de datos HRTF. En el segundo y tercer caso (arriba a la derecha y abajo a la izquierda), se ha introducido un valor de $\varphi=40^\circ$ y $\theta=220^\circ$ respectivamente. Los cuales pertenecen a la base de datos HRTF. En estos casos el programa realiza una interpolación de dos puntos como se muestra el mensaje en el panel. En el cuarto y último caso se tienen valores de phi y theta conocidos con lo cual no es necesaria la interpolación para la representación gráfica

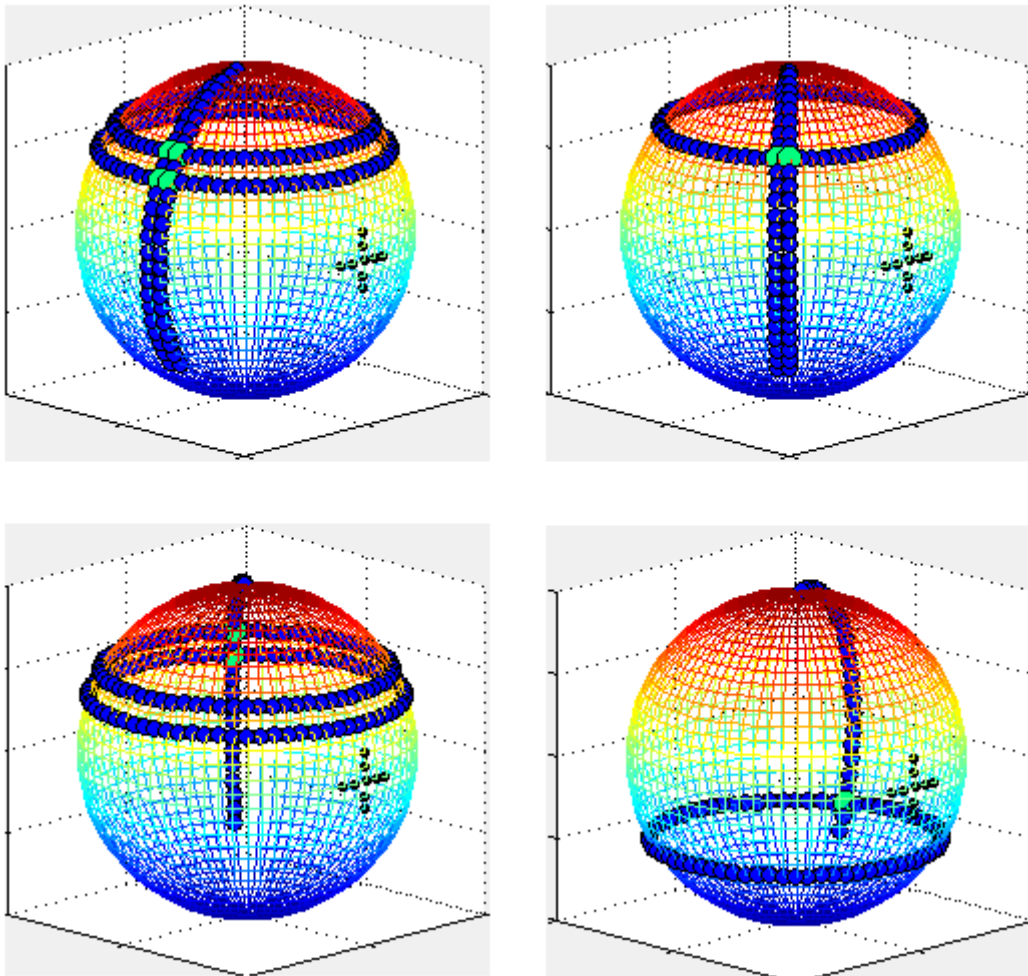


Figura 50. Representación espacial de los puntos seleccionados para representar.

La figura anterior muestra la representación espacial del punto seleccionado en cada caso refiriéndose a los casos de la *figura 49*. Para el caso primero, la interpolación de cuatro puntos se describe con el color verde, estando el punto introducido comprendido entre ellos. En los casos segundo y tercero, siendo casos de interpolación de dos puntos, en theta y en phi respectivamente, se muestra consecuentemente sólo dos puntos verdes. El último caso

representa un punto ya que coinciden los límites, estando los valores de phi y theta dentro de la base de datos HRTF.

Los dos posibles accesos de introducción de datos han sido ya explicados. Es importante hacer saber al usuario que la alternancia de estos dos accesos es totalmente libre en cualquier momento que se quiera. Esto se representa con las flechas azules en el diagrama de flujo representado en el apartado anterior (*Figura 43*). La siguiente figura muestra el aspecto de la interfaz gráfica usando el acceso representado por la opción 2 en este apartado.

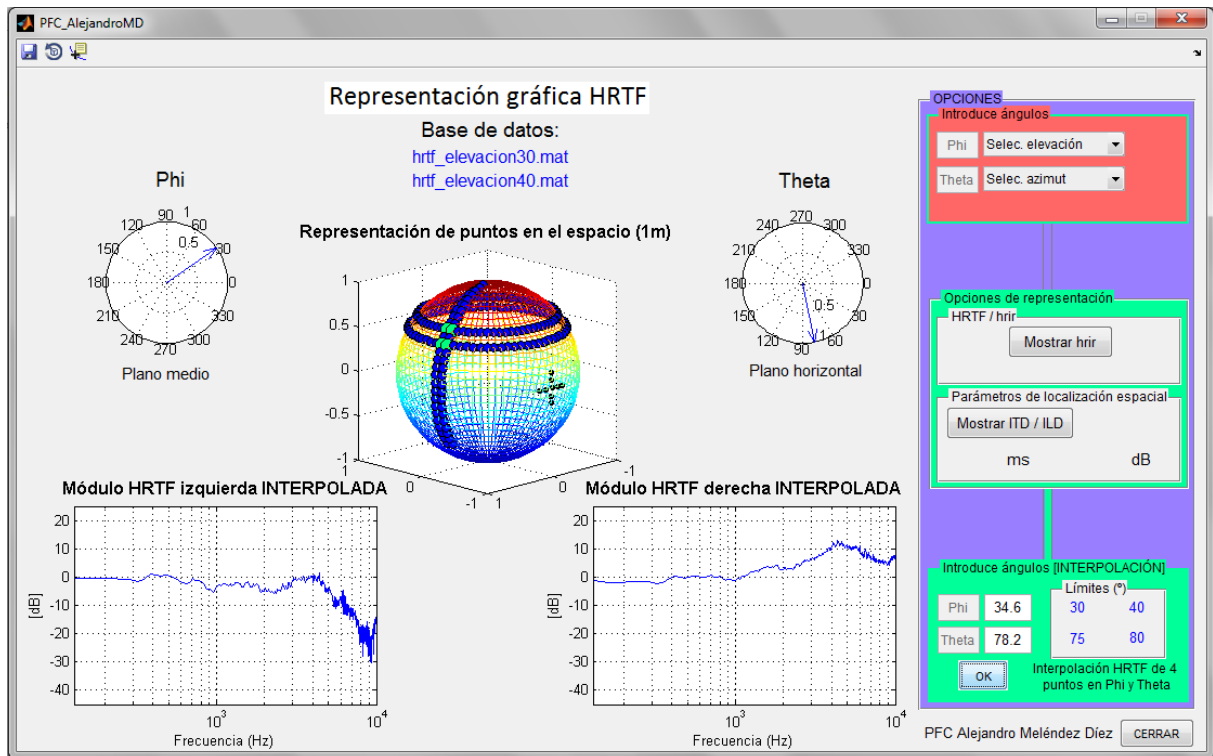


Figura 51. Aspecto final en la representación de puntos para realizar la interpolación.

Como ya habrá notado el lector, se producen cambios en el aspecto de la interfaz. Dependiendo del acceso que se de uso para introducir datos, los paneles que pertenecen al panel de “OPCIONES” cambiarán de color.

El color verde denota activación, además los puntos a representar espacialmente resaltan esta activación teniendo el mismo color en común. Por el contrario, el color rojo significa desactivación, la sección que esté roja no tendrá ninguna relación en absoluto con lo que se está representando. Los colores se irán alternando dependiendo del acceso de datos que tenga el usuario.

La siguiente figura representa la combinación de colores para los diferentes accesos de introducción de datos.



Figura 52. Alternancia de estados de introducción de datos.

Si se aprecia la figura anterior, en el caso de la derecha el panel de introducción de datos de interpolación tiene una línea verde que llega al panel de opciones de representación. En el caso de la izquierda esa línea verde llega a este mismo panel pero desde el panel de introducción de datos de la base de datos HRTF. Esto indica lo que a continuación se describirá en detalle, es la posibilidad de cambiar de estado de representación mediante los botones “Mostrar HRIR” y “Mostrar ITD/ILD” además de sus valores representados en ms y en dB.

5.2.4.2 Representación de datos

Los botones incluidos en el panel de opciones de representación son los responsables de los cambios de representación gráfica de la interfaz.

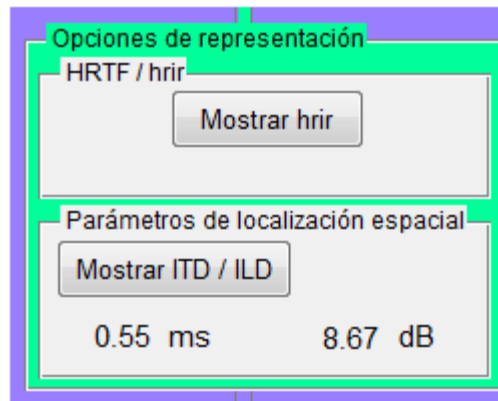


Figura 53. Panes de opciones de representación.

En la *figura 53* se muestra el panel de opciones. Se divide en dos sub-paneles, el primero incluye el botón “Mostrar HRIR” y el segundo el botón “Mostrar ITD/ILD”. Además de los valores de estos parámetros. Comentar que estos botones, al iniciar la aplicación comenzarán en un estado de desactivación hasta que no se introduzcan los datos y se representen ya que sería motivo de error para la aplicación. Seguidamente se describe su funcionalidad por separado.

→ HRTF / HRIR

Independientemente del acceso elegido por el usuario para la introducción de datos, este botón realiza la alternancia entre la representación de la respuesta en frecuencia y la representación de la respuesta al impulso del oído izquierdo y del oído derecho. El botón cambiará de estado de representación cuantas veces queramos. Además, el estado propio del mismo cambiará también, pasará de “Mostrar HRIR” a “Mostrar HRTF”. La figura siguiente muestra la alternancia de estados de representación para valores introducidos mediante la opción 1 (*Figura 44*).

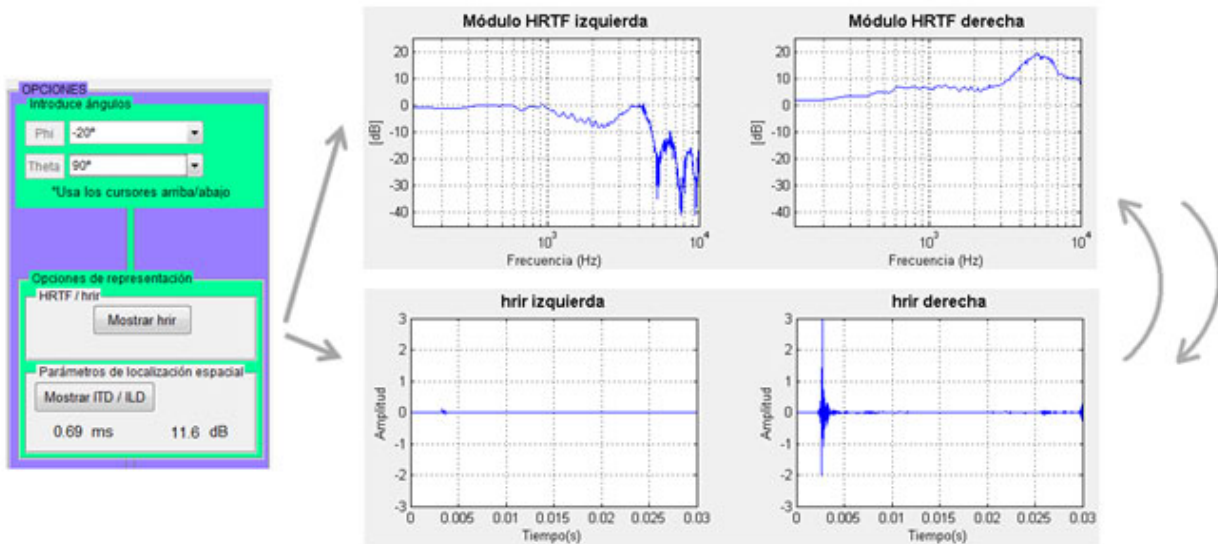


Figura 54. Representación gráfica conmutando el botón “Mostrar HRIR” desde opción 1.

En esta situación el usuario puede cambiar los valores de phi y theta a su antojo. Se realiza tanto como la representación espacial de los puntos como para la respuesta en frecuencia o la respuesta al impulso.

Esta faceta de la interfaz le da una gran versatilidad ya que representa el poder cambiar de valores de phi y theta (opción 1 u opción 2) en cualquier momento o estado de representación de la interfaz gráfica de usuario.

En la siguiente, la *figura 55*, se observa las representaciones que se muestran en la interfaz cuando se pulsa el botón “Mostrar HRIR” y “mostrar HRTF” según sea el caso. Estas gráficas representan, como su título indica, el “Modulo HRTF izquierda y derecha INTERPOLADA” para el caso de la respuesta en frecuencia y “HRIR izquierda y derecha INTERPOLADA” para el caso de la respuesta al impulso. En el caso cuarto que muestra la *figura 49* se mostrarán los títulos sin la palabra “INTERPOLADA”.

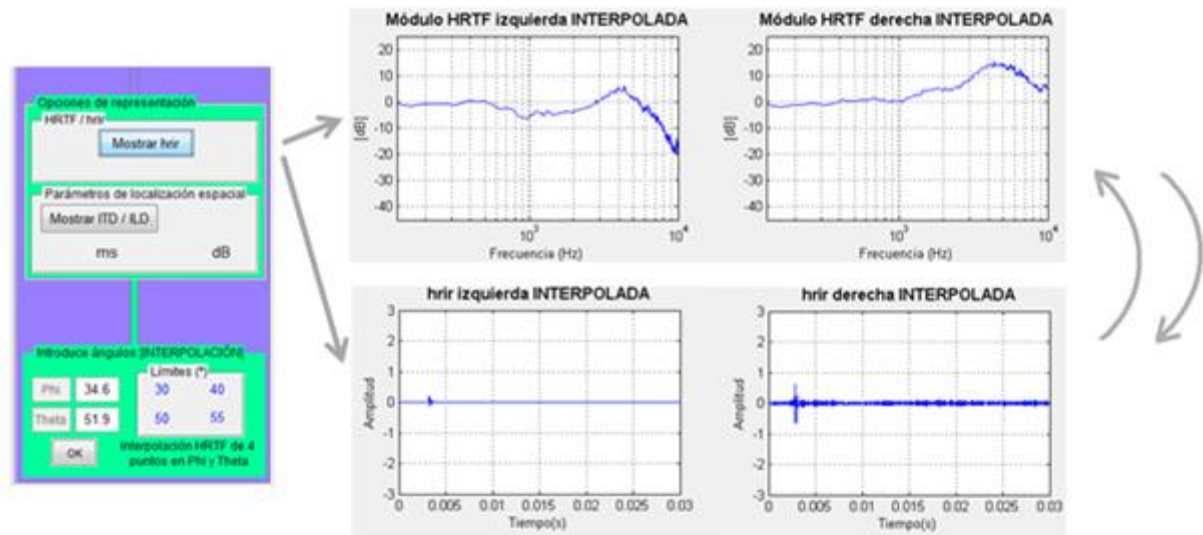


Figura 55. Representación gráfica conmutando el botón “Mostrar HRIR” desde opción 2.

→ Parámetros de localización espacial ITD / ILD

Antes de comenzar con la descripción en detalle de la función del botón “Mostrar ITD/ILD” se indica que ya que se han introducido valores para phi y theta para el ejemplo cualquiera que sea su origen (opción 1 u opción 2).

Debajo del este botón se representan en este panel el parámetro ITD y el parámetro ILD. Están definidos en ms y dB en función del azimuth respectivamente. Esto ocurre antes de que el usuario pulse el botón ya que este botón lo que representa son las tablas ILD e ITD, es decir, las gráficas de la media en frecuencia de cada elevación de estos dos parámetros en función del azimuth, los valores de ITD e ILD se escriben directamente.

Es significativo conocer cómo funciona el botón “Mostrar ITD /ILD” independientemente de cuando pulse el usuario este botón, esto es, si se está representando la respuesta en frecuencia o la respuesta al impulso, al pulsarlo se representará las gráficas de media ITD e ILD. La figura 56 siguiente representa este hecho.

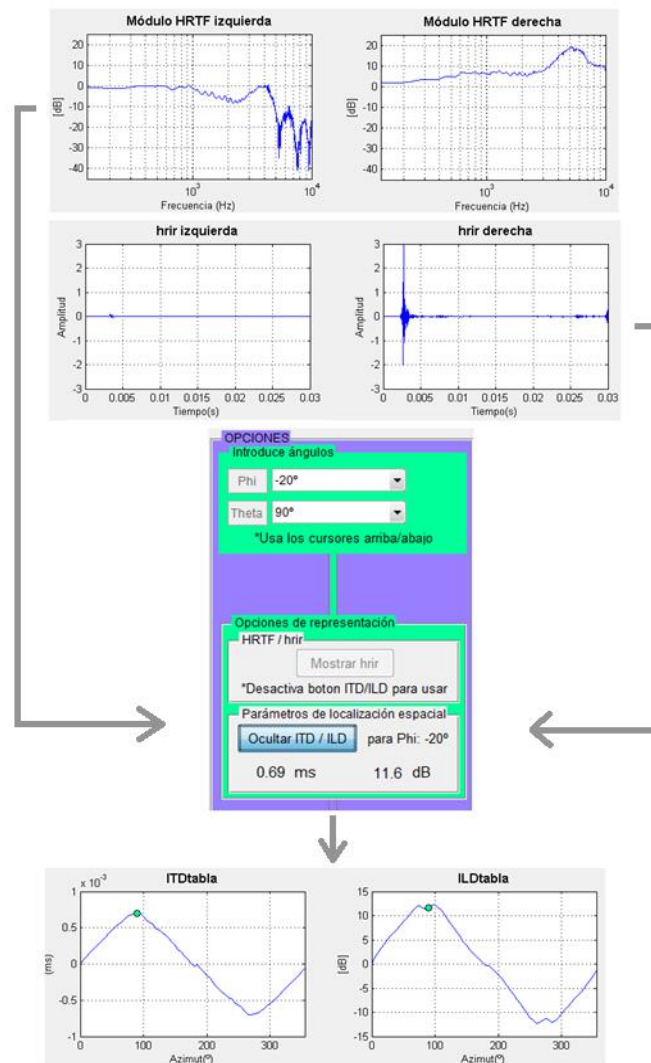


Figura 56. Representa la función del botón “Mostrar ITD/ILD” independientemente del estado de representación y desde la opción 1.

Además, al pulsar este botón se desactivará el botón “Mostrar HRIR” y se reactivará al des pulsarlo (figura 56). Se tienen tres estados de representación para dos botones, de no ser así, sería muy complicada la configuración de la interfaz gráfica. La interfaz contiene un mensaje de aviso al usuario para que éste sepa qué debe hacer.

Ya que la representación de las tablas depende exclusivamente del valor de phi introducido, se muestra phi justo al lado derecho del botón de este panel. El punto verde en la gráfica indica el valor de azimuth introducido para la representación de datos introducidos opción 1 (figura 44).

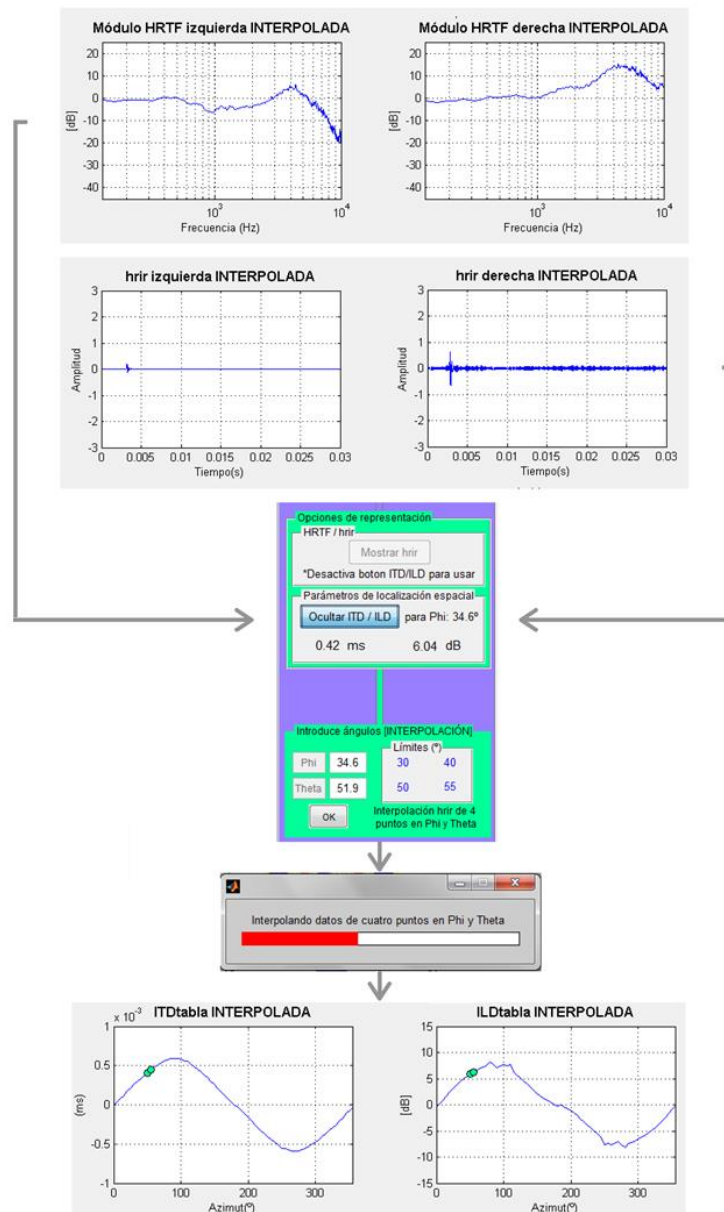


Figura 57. Representa la función del botón “Mostrar ITD/ILD” independientemente del estado de representación y desde la opción 2.

Cuando los datos son introducidos a través de la opción 2 (figura 44) y se pulsa el botón “Mostrar ITD/ILD”, la acción es ligeramente diferente comparándolo con el acceso de datos de la otra opción. Se debe realizar la interpolación primero de las HRIR para la elevación introducida y después crear las tablas de media en frecuencias ITD e ILD.

La figura 57 muestra este proceso. El usuario debe esperar 20 segundos para que el programa cree las tablas y así poder representarlas. En esta figura se muestra las tablas ITD e ILD en las cuales tenemos dos puntos verdes, son los puntos de los límites en azimuth que el programa necesita para realizar la interpolación. Límite inferior y superior del valor de theta introducido. Se obtiene el valor de ITD y el valor de ILD interpolado, para ello es necesario tomar estos dos límites y obtener el valor ITD e ILD realizando una interpolación lineal.

Capítulo 6. Trabajo de investigación de HRTF

6.3 Introducción

En esta sección del presente proyecto fin de carrera se realiza un estudio de la relevancia de las medidas HRTF en el marco científico. Se recurre pues, al análisis y a la examinación de la información referente a este tema a través de diversas fuentes de información disponibles como:

- Revistas de información general y especializada
- Monografías
- Proyectos técnicos
- Publicaciones oficiales de instituciones

Se describirá cada una de las fuentes escogidas para su estudio y así, comprender el propósito de cada una. Se crearán categorías o grupos de conceptos se sean semejantes para un mayor entendimiento del lector. La síntesis de la información seleccionada conduce a la generación de una idea sobre cada artículo, llegando conclusiones que se darán espacio en el apartado “Conclusiones finales”.

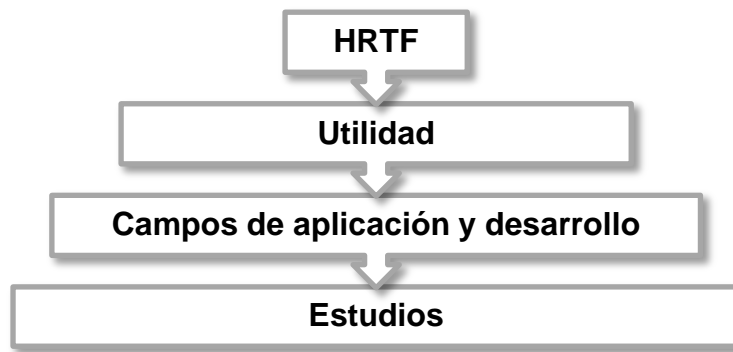


Figura 58. Esquema del proceso seguido para el trabajo de investigación.

La figura anterior muestra el proceso que se ha seguido para abarcar de la mejor forma posible el objetivo de presente trabajo de investigación de las HRTF. Es imprescindible conocer la naturaleza de las HRTF previamente, por ello se indica al lector que realice consulta de los capítulos 2 y 3 de este proyecto, cuando le sea oportuno recordar cualquier concepto relacionado con las HRTF.

Seguidamente, se procederá al desarrollo de la información recogida para su posterior análisis, de tal forma que se obtengan unas conclusiones de interés.

6.2 Desarrollo

A medida que van pasando los años, avanzan las investigaciones en el campo de la audición, queriendo saber más sobre la naturaleza del sistema de referencia auditivo del ser humano. Inicialmente, Blauert (1974) definió a la función de transferencia como la función de transferencia en campo libre (AFT). Otros términos incluyen en campo libre a la función de transferencia de tímpano y la transformación de la presión-campo libre al tímpano. Menos estudios describen específicamente la función de transferencia de pabellón de la oreja, la PRTF (Pinna Related Transfer Function), la función de transferencia del oído externo, o función de transferencia direccional (DTF).

A continuación, se entra en detalle de los desarrollos de las diferentes fuentes de información recopilada. Se muestra el título entre comillas de cada artículo además de su referencia para su consulta detallada en el capítulo 9 “Referencias bibliográficas”. Se comentarán los aspectos más relevantes de estos estudios además de explicar su finalidad y a los objetivos a los que éstos llegan. Se decide realizar una distinción por categorías de campos de aplicación de las HRTF.

- **Aplicación en el estudio de la localización espacial humana**

“Estimating head-related transfer functions of human subjects from pressure–velocity measurements”

[Hiipakka 12]

De este artículo se extrae que las HRTF tomadas con un micrófono de sonda en el tímpano no son fiables, además de ser muy arriesgado para la conservación del estado del tímpano del sujeto. En su lugar, las HRTF se miden comúnmente a partir de la entrada del canal auditivo, excluyendo los efectos de los canales auditivos y los tímpanos. En este trabajo se presenta un método que permite la obtención de respuestas de frecuencia de HRTF a través de mediciones llamadas “presión de velocidad” (PU), mediante un sensor de PU en miniatura.

Las comparaciones entre los diferentes métodos muestran que el método presentado es una técnica válida y fiable.

“Dimensionality Reduced HRTFs: A Comparative Study”

[Kapralos 08]

Este artículo resalta la viabilidad de realizar regresiones de la dimensión de las HRTF, siendo una herramienta estadística muy utilizada para datos como el que nos ocupa. Se realiza un estudio de localización de la fuente sonora cuando se presenta en un entorno virtual de sonido sintetizado utilizando HRTFs, cuya dimensión era reducida mediante regresión. Se producen mejores resultados en localización de la fuente comparándolo con otros métodos de dimensionado.

“Statistical analysis of head related transfer function (HRTF) data”

[Luo 13]

Debido a que las medidas de HRTF muestran una considerable variabilidad inter-personal, es un problema importante el desarrollo de un modelo general de las HRTF, siendo éste una meta que persigue la antropometría. Los creadores de este artículo han desarrollado técnicas de regresión [Kapralos 08], sugieren métodos de HRTF interpolación, extrapolación HRTF, extracción de características y toma de muestras. Los métodos se prueban en la base de datos CIPIC.

“Robust and low complexity localization algorithm based on head-related impulse responses and interaural time difference”

[Wan y Liang 12]

Este artículo muestra la obtención de la medida HRTF utilizando un robot monitorizado y un algoritmo. Para los puntos de azimut son estimados mediante un algoritmo de correlación cruzada basado en las ITD y mediante las respuestas al impulso HRIR. Los resultados muestran un mejor rendimiento en la localización de un evento que usando otros algoritmos de varios canales.

“Effect of long-term training on sound localization performance with spectrally warped and band-limited head-related transfer functions”

[Majdak 13]

Este artículo investiga las razones por las cuales un sujeto localiza una fuente sonora en el plano medio, pasando por la cabeza de adelante atrás. Debido al efectos del filtrado realizado por la cabeza, oreja y torso, determinan que las claves espaciales están codificadas entre el rango de frecuencias de 4kHz hasta 16kHz. El rendimiento con sonidos de banda limitada fue mejor que con los de banda ancha. Esto sugiere que los oyentes con discapacidad auditiva que tienen un acceso limitado a altas frecuencias, pueden mejorar su capacidad de localización cuando se proporciona una señal de banda limitada en su rango audible.

“Rigid sphere room impulse response simulation: Algorithm and applications”

[Jarrett 12]

Este trabajo propone un método para la simulación de las respuestas al impulso de las habitaciones entre la fuente sonora y micrófonos colocados en una estructura esférica. Este estudio tienen aplicación en saber cómo es la localización humana ya que los valores de ITD e ILD varían en función de las dimensiones de la sala en donde se realiza la medida. Con las medidas realizadas se crea un algoritmo que pueda predecir los efectos del movimiento de la cabeza y los cambios ambientales como el tiempo de reverberación. Este hecho elimina cualquier experimento usando un maniquí acústico.

“On the spatial symmetry of head-related transfer functions”

[Xiao-Li, Feng-chun y Bo-Sun 13]

Mediante análisis estadísticos de correlación cruzada ha sido posible realizar una comparación de la simétrica izquierda-derecha de las HRTF para los planos horizontal y vertical. Se obtuvo un coeficiente de asimetría por debajo del 0.05, para el plano horizontal, siendo muy grande esta simétrica por debajo de 1.1kHz. En el plano medio la simetría se obtiene hasta 5.5kHz, además de que el coeficiente de asimetría es mucho mayor para delante-detrás comparándolo con izquierda-derecha, en el plano horizontal. La conclusión es, por encima de 4kHz la asimetría izquierda-derecha de las HRTF es bastante perceptible.

“Measurement of the head-related transfer function of a bat-head cast”

[Yeon 09]

Los resultados del experimento desvelaron diferencias espectrales para valores para diferentes valores de azimut. El rango de frecuencias es superior al del ser humano (de 5kHz hasta 100kHz), para frecuencias superiores a 10kHz existe gran variación de nivel, lo que no ocurre para frecuencias inferiores. Tiene similitud a la respuesta del HRTF de ser humano. Las características binaurales del murciélago se basan en el efecto de la cabeza y el del pabellón auditivo.

“Localization and tracking of moving objects in two-dimensional space by echolocation”

[Matsuo 12]

Estudios anteriores a éste, se realizaron para determinar el sistema de audición de los murciélagos [Yeon 09]. Se obtuvieron funciones de transferencia de la cabeza de un murciélago, llegando a la conclusión que debido a la forma del pabellón de las orejas de éstos, conseguían una localización muy precisa de la fuente sonora. El artículo presente declara avances al respecto, los murciélagos utilizan la ecolocación de frecuencia modulada para identificar y capturar objetos en movimiento en el sector tridimensional.

- **Aplicación en el estudio de generación y reproducción de sonido envolvente(3D)**

“Procesador de sonido y estudio de métodos para la generación de audio 3D en tiempo real”

[Benedito 12]

Este estudio abarca completamente los métodos existentes de generación de audio 3D. Es posible crear sonido tridimensional mediante unos auriculares creando un efecto de holofonía, generado a través de HRTFs y el efecto de externalización (RIR, respuesta al impulso de la sala), el cual es necesario para generar efectos de reverberación, siendo de vital importancia en la generación de sonido 3D creíble. Este estudio mantiene la posibilidad de implementar el cálculo de la RIR en tiempo real, eliminando una base de datos necesaria.

“The Real-Time Implementation of 3D Sound System using DSP”

[Kim 04]

El presente estudio describe un sistema de sonido 3D dando uso a la implementación de un DSP incorporado. Desarrolla un nuevo algoritmo de sonido 3D aplicado a auriculares basado en el método de localización de la fuente que proporciona las HRTF. El software diseñado es eficiente y realiza los cálculos a tiempo real. El nuevo algoritmo proporciona una escucha envolvente comparándolo con un simple estéreo o el sistema Dolby de sonido envolvente. El algoritmo puede ser desarrollado en aplicaciones móviles.

“Apparatus for creating 3D audio imaging over headphones using binaural synthesis including elevation”.

[Cashion y Williams 98]

Mediante la generación de una señal binaural en unos auriculares es posible generar señales moviéndose en el plano horizontal y vertical. Realizando un procesamiento de señal aplicando filtros de reflexiones delanteras y traseras, filtros de reverberación izquierda y derecha y filtros de elevación arriba y abajo.

“Generating 3D audio using a regularized HRTF/HRIR filter”

[Chen 11]

El objetivo de esta investigación es eliminar las discontinuidades molestas de los modelos de HRTF cuando la fuente sonora está en movimiento. Se ha diseñado un filtro de HRTF regularizado que se le aplica a la señal a reproducir de manera envolvente. Se utilizan funciones de características espaciales (SCF) con diferentes factores de suavizado para la generación de dicho filtro.

“Desarrollo de un sistema de multiconferencia inmersiva con audio 3D para móviles”

[Aguilera 11]

Mediante la técnica binaural de espacialización del sonido basada en HRTF es posible concretar un modelo de respuesta del sistema auditivo humano. Este modelo se incluye en el desarrollo de aplicaciones móvil en sistemas operativos como Android o iOS. El estudio mejora la generación de multiconferencia incorporando sonido espacial por medio de dispositivos móviles.

“Fast 3D Audio Image Rendering Using Equalized and Relative HRTFs”

[Fu 13]

En este estudio se aborda la renderización de sonido 3D en tiempo real. Se utiliza un método de igualación de las HRTF ya que el sistema electroacústico presenta distorsión. Se usan aplicaciones de procesamiento de sonido 3D que reducen en más de un 50% la carga de cálculo. Por último, se presenta un sistema de representación de imágenes de sonido 3D renderizado siendo más realista que la que las señales originales.

“New Real-Time Implementation Of 3d-Sound System Using TLA Algorithm”

[Kim y Jeong 97]

Se presenta un nuevo algoritmo de sonido 3D usando la TLA (Table Lookup Architecture). Este algoritmo tiene mejores en comparación con los existentes ya que es programable y escalable, teniendo una filosofía “low-cost” en el procesado de datos. El corazón de la arquitectura son las tablas de consulta definidas, cuyo contenido se puede cambiar fácilmente para diferentes requisitos de la aplicación. Enfocan el estudio en su aplicación para televisores, ordenadores y sistemas de audio.

“TDE-ILD-HRTF-Based 3D Entire-Space Sound Source Localization Using Only Three Microphones and Source Counting”

[Pourmohammad 11]

Se utilizan métodos basados en TDE para la localización de la fuente siendo la señal de excitación de banda ancha. Se utilizaron al menos cuatro micrófonos de alta sensibilidad. Proponen un nuevo enfoque para la localización de la fuente en todo el espacio 3D utilizando TDE, ILD y HRTF simultáneamente a través de tres micrófonos.

6.3 Conclusión

En esta sección se cumple el objetivo de extracción de los conceptos más notables, además de la utilidad en el tratamiento de bases de datos HRTF.

En el apartado anterior se han expuesto los estudios más relevantes en la aplicación de las HRTF. Sin duda alguna, tratan las HRTF de forma fundamental e imprescindible para la comprensión del sistema de audición humano.

Su uso sirve para comprender, desarrollar y mejorar dicho sistema por medio de técnicas de procesamiento de datos que hagan posible la creación de modelos o patrones en donde basar fielmente los resultados obtenidos. Los esfuerzos no solo se enfocan en explicar con diversas técnicas el fenómeno de la audición espacial, sino que también se valoran factores ajenos a las condiciones que presentan las medidas en espacios sin reflexión sonora. La presencia de paredes, techo y suelo, además de sus formas y dimensiones, ayudan de manera significativa en la percepción del evento sonoro.

En la gran mayoría de los artículos publicados coinciden en que es muy complicado obtener un modelo general de HRTF, debido a la gran dependencia de los resultados de las medidas con las características físicas de cada individuo. La forma la cabeza, la forma del pabellón auditivo o incluso la forma del conducto auditivo, son elementos a tener en cuenta. Con lo cual, es de uso habitual el tratamiento de bases de datos HRTF genéricos, intentando adaptar las aplicaciones a la mayoría de los individuos posibles.

Se tiene un particular interés en los sistemas de generación y reproducción de entornos virtuales de sonido 3D. Existen gran variedad de campos de aplicación como la televisión, el cine o los videojuegos, así como en la mejora de la audición para personas con discapacidad auditiva. La aplicación de esta práctica en un oyente que tenga déficit de audición en un

determinado intervalo del espectro es muy beneficiosa, ya que se observa una mejora en el reconocimiento y localización de las fuentes sonoras. Es necesario que esta señal de excitación esté dentro del espectro audible del sujeto.

La importancia de la reproducción de sonido 3D en tiempo real está incrementando dentro del marco científico, comercial y de ocio. La demanda de sistemas capaces de operar de esta forma aumenta rápidamente, por lo que gran parte de los estudios que se realizan tiene como principal objetivo la implementación de funciones que permitan la generación y adaptación a estos procesos en tiempo real.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 Aportaciones

El objetivo del actual proyecto fin de carrera ha sido la creación de una interfaz gráfica de usuario que sea capaz de representar los datos más relevantes extraídos de la base de datos de HRTF.

La información contenida en la base de datos HRTF precisa de una resolución espacial determinada que se amplía realizando el cálculo de interpolación, de esta manera el usuario podrá representar la información contenida en dicha base de datos, de cualquier punto en el espacio.

Esta información es pieza fundamental en el estudio del sistema de percepción que el ser humano dispone para realizar la localización de una fuente sonora en el espacio. Por medio de la interfaz, el usuario puede visualizar tanto las respuestas en frecuencia HRTF del oído izquierdo y derecho, como las respuestas al impulso de ambos, HRIR. A partir de estos datos y mediante cálculos computacionales realizados en MATLAB, se extraen los parámetros de localización espacial (ITD e ILD), siendo las diferencias interaurales especialmente valiosas en el estudio del sistema de audición humano.

La interfaz cumple con la función de representación para la que fue diseñada. No solo realiza la exposición de las gráficas y parámetros pertinentes, sino que además ayuda al usuario a comprender los datos mostrados. Por ello y debido a las características de medida de la base de datos de HRTF, se ha optado por la presentación de una esfera que reúne todos los puntos de colocación de la fuente sonora en el espacio. Así, el usuario puede orientarse de manera cómoda en la selección de datos a representar.

La versatilidad de uso es uno de los puntos más fuertes del diseño de la interfaz. El usuario podrá alternar entre estados de representación y entre formas de introducción de datos de manera ilimitada. Así la interfaz reproduce las acciones del usuario de forma instantánea.

El trabajo de investigación realizado aporta conocimientos avanzados en el tratamiento y desarrollo de las base de datos de HRTF. Mediante técnicas de procesamiento de datos se hace posible la creación de modelos generales en la búsqueda de mejorar los resultados. Todos los

artículos contrastados ponen en manifiesto el beneficio de las HRTF en la comprensión del sistema de audición.

Actualmente la aplicación de las HRTF en sistemas de generación y reproducción de sonido 3D tiene gran importancia. La implementación de filtros extraídos de las HRTF hacen posible la simulación de sonido envolvente, haciendo que la demanda de sistemas capaces de operar en tiempo real se incremente rápidamente. Estos estudios de difusión hacen posible la continuidad de ensayos o publicaciones en el futuro.

7.2 Líneas futuras

La funcionalidad de la interfaz diseñada puede ser de gran ayuda en diversas aplicaciones.

La existencia de la interfaz genera la posibilidad de ser adaptada a otras bases de datos tales como la del MIT (MediaLab Institute of Technology of Massachusetts), la de Itakura Laboratory o CIPIC (Center for Image processing and Integrated Computing), permiten ser tratadas para su representación. Es importante tener en cuenta que será necesario adaptar las características de medida de cada base de datos, lo que no produce ningún exceso de trabajo adicional.

Un camino a seguir en la utilidad que brinda la interfaz es la posibilidad de generar y reproducir sonido envolvente en una representación binaural. Puesto que la base de datos de HRTF contiene la información necesaria para su desarrollo, se pueden aplicar los filtros para lograr sonido 3D. De este modo, sería posible reproducir cualquier sonido desde cualquier punto contenido en la base de datos hasta la simulación de una secuencia de movimientos de la fuente sonora en cualquier dirección y sentido. La futura interfaz podría disponer de varios métodos de interpolación siendo de gran importancia ya que amplía y genera mayores aplicaciones en el estudio de las HRTF.

La conversión del código de la interfaz a otros lenguajes es de gran utilidad para conseguir una compatibilidad de aplicaciones mayores. Su adaptación para ser representada en una página web se augura de gran provecho, haciendo de la interfaz una fuente de información y de ayuda para otros proyectos y objetivos.

Actualmente, el uso de dispositivos móviles o tabletas suponen un recurso tecnológico de información digital polivalente que ha de valorarse de forma que se adapte a los tiempos que corren. Por ello se establece la oportunidad del desarrollo y aplicación de la interfaz gráfica de usuario en estos dispositivos.

Capítulo 8. Implementación en MATLAB

En esta sección se ha decidido por mostrar la lista de funciones implementadas en la generación de la interfaz gráfica de usuario. Se ha optado por no detallar el código completo ya que puede ser una tarea tediosa para el lector además de no ser lugar en la presente memoria. Se adjunta a este proyecto un cd donde es posible la ejecución del programa (“PFC_AlejandroMD.m”) donde se podrá ver el código de programación si así se desea.

- Funciones de representación

```
representar3d_phi(op, handles)
```

```
representar3d_theta(op, handles)
```

```
representarpunto(posicionPhi,posicionTheta,handles)
```

```
representar4puntos3d(opcionPhiMin,opcionPhiMax,opTHETAMin,opTHETAMax,pmin,tmin,pmax,tmax,handles)
```

```
representarHRTF(archivoHRTF,anguloTheta,handles)
```

```
representarhrir(archivoHRIR,anguloTheta,handles)
```

```
interpolacionHRTF(pmin,pmax,tmin,tmax,handles)
```

```
interpolacionHRIR(pmin,pmax,tmin,tmax,handles)
```

- Funciones de cálculo de interpolación

```
interpolacionHRTF(pmin,pmax,tmin,tmax,handles)
```

```
interpolacionHRIR(pmin,pmax,tmin,tmax,handles)
```

- Funciones de cálculo adicional

`representarvaloresITDILD(data_ITDILD,handles)`

`escribirvaloresITDILD(data_ITDILD,handles)`

Capítulo 9. Referencias bibliográficas

→ Artículos

- [Aguilera 11] Emanuel Aguilera Martí , “Desarrollo de un sistema de multiconferencia inmersiva con audio 3D para móviles”, Máster Universitario En Inteligencia Artificial, Reconocimiento De Formas E Imagen Digital, Universidad Politécnica De Valencia, 2011.
- [Arias y Ramos 03] Claudia Arias y Oscar A. Ramos “Audición Espacial en Ambientes Reverberantes: Aspectos Teóricos Relevantes”, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, 2003.
- [Benedito 12] Pablo Benedito Botella , “Procesador de sonido y estudio de métodos para la generación de audio 3D en tiempo real”, Tesis De Master, Universidad Politécnica De Valencia, 2012.
- [Brown y Duda 97] C. Phillip Brown and Richard O. Duda, “An Efficient HRTF Model For 3-D Sound”, New Paltz, NY, 97.
- [Brungart y Romigh 10] Douglas S.Brungart and Griffin D.Romigh, “Head related transfer function(HRTF) enhancement for improved vertical-polar location in spatial audio systems”, The United States of America as represented by the Secretary of the Air Force, 2010.
- [Cashion y Williams 98] Terry Cashion, Simon Williams, “Apparatus for creating 3D audio imaging over headphones using binaural synthesis including elevation”, 1998.
- [Chen 11] Jiashu Chen, “Generating 3D audio using a regularized HRTF/HRIR filter”, acoustical patent review, 2011.
- [Cheng 99] CI Cheng, “Representations of HRTFs in time, frequency, and Space”, presented at the 107nd A.E.S. Convention, GH Wakefield (1999).
- [Corey 01] Corey I. Cheng, ”Visualization, measurement, and interpolation of head-related transfer functions(HRTF's) with applications in electro-acoustic music”, Electrical Engineering: Systems, The University of Michigan, 2001.

- [Fernández de Córdoba 07] Gonzalo Fernández de Córdoba, “Creación de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con MATLAB”, Septiembre de 2007.
- [Fu 13] Zhong-hua Fu, Lei Xie, Dong-mei Jiang, Yan-ning Zhang, “Fast 3D Audio Image Rendering Using Equalized and Relative HRTFs”, 2013 IEEE, 2013.
- [Gardner y Keith 95] Gardner, William G and Martin, Keith D., “HRTF measurements of a KEMAR”, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 97, Issue 6, June 1995.
- [Hiipakka 12] Marko Hiipakka, Teemu Kinnari, Ville Pulkki, , “Estimating head-related transfer functions of human subjects from ressure–velocity measurements”, Acoustical Society of America, 2012.
- [Hofman 98] Paul M. Hofman, Jos G.A. Van Riswick and A. John Van Opstal, “Relearning sound localization with new ears”, 1998.
- [Hofman y Opstal 02] Paul M. Hofman y Jos G.A.V.Opstal, “Biaural weighting of pinna cues in human sound localization”, 2002.
- [Jarrett 12] D. P. Jarrett E., A.P. Habets, M. R. P. Thomas and P. A. Naylor, “Rigid sphere room impulse response simulation: Algorithm and applications”, Acoustical Society of America, 2012.
- [Kapralos 08] Bill Kapralos, Nathan Mekuz, Agnieszka Kopinska and Saad Khattak, “Dimensionality Reduced HRTFs: A Comparative Study”, Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE 2008, vol. 352, 2008.
- [Kim 04] Hyung-Jung Kim, Deock-Gu Jee, Man-Ho Park, Byung-Sik Yoon, Song-In Choi, , “The Real-Time Implementation of 3D Sound System using DSP”, Vehicular Technology conference, 2004.
- [Kim y Jeong 97] Tae-Sun Kim, Seh-Woong Jeong, Byung-Chul Park, And Sang4 Park, “New Real-Time Implementation Of 3d-Sound System Using TLA Algorithm”, IEEE Conference Publications, 1997.
- [Lahoz 09] Àlvar Lahoz Xaus, “Sonido 3d: La Percepcion Acústica Egocentrica Y Principios De Sistemas Espaciales”, Proyecto Final Bachelor Of Recording Artsbra, Barcelona, 2009.
- [Lee 09] Yunjae Lee¹, Youngjin Park² and Youn-sik Park, “Newly Designed HRTF Measuring System”, Fukuoka International Congress Center, Japan, 2009.
- [Luo 13] Yuancheng Luo, Dmitry N. Zotkin and Ramani Duraiswami, , “Statistical analysis of head related transfer function (HRTF) data”, ICA Montreal Montreal, Canada, 2013.

- [Majdak 13] Piotr Majdak, Thomas Walder, and Bernhard Laback , “Effect of long-term training on sound localization performance with spectrally warped and band-limited head-related transfer functions”, Acoustical Society of America, 2013.
- [Matsuo 12] Ikuo Matsuo, “Localization and tracking of moving objects in two-dimensional space by echolocation”, Acoustical Society of America, 2012.
- [Mills 72] Mills, “Auditory Localization”, Ed. Tobias, Foundations of Modern Auditory Theory, Academic Press, 1972.
- [Pourmohammad 11] Ali Pourmohammad, Seyed Mohammad Ahadi “ TDE-ILD-HRTF-Based 3D Entire-Space Sound Source Localization Using Only Three Microphones and Source Counting, 2013 IEEE, 2013.
- [Ramos y Cobos 13] “Parametric head-related transfer function modeling and interpolation for cost-efficient binaural sound applications (L)”, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume: 134, Published: 2013-Sep.
- [Rothbucher 13] Martin Rothbucher,a) Kajetan Veprek, Philipp Paukner, Tim Habigt, and Klaus Diepold, “Comparison of head-related impulse response measurement approaches”, Journal Of The Acoustical Society Of America Volume: 134 Published: August 2013.
- [Rothbucher y Habigt 10] Martin Rothbucher, Tim Habigt, Julian Habigt, Thomas Riedmaier and Klaus Diepold , “Measuring Anthropometric Data for HRTF Personalization”, Sixth International Conference on Signal-Image Technology and Internet Based Systems, 2010.
- [Schoof 12] Tim Schoof, Tim Green, Andrew Faulkner, and Stuart Rosen, “Advantages from bilateral hearing in speech perception in noise with simulated cochlear implants and residual acoustic hearing”, Speech, Hearing and Phonetic Sciences, University College London, 2012.
- [Toyama 99] M. Toyama, M. Uchiyama, And H. Nomura, “Head Related Transfer Function Representation Of Directional Sound For Spatial Acoustic Events Modeling”, IEEE Conference Publications, 1999.
- [Usategi 12] Karmelo Usategi de la Peña , “Procesador de sonido y estudio de métodos de interpolación de la localización de fuentes basados en HRTFs para la generación de audio 3D”, Tesis De Master, Universidad Politécnica De Valencia, 2012.
- [Wan y Liang 12] Xinwang Wan and Juan Liang , “Robust and low complexity localization algorithm based on head-related impulse responses and interaural time difference”, 2013 Acoustical Society of America, 2012.

- [Xiao-Li, Feng-chun y Bo-Sun 13] Xiao-Li Zhong, Feng-chun Zhang, Bo-Sun Xie, “On the spatial symmetry of head-related transfer functions”, Applied Acoustics, 2013.
- [Yeon 09] Su Yeon Kim, Timos Papadopoulos, Robert Allen and Daniel Rowan, “Measurement of the head-related transfer function of a bat-head cast”, Proceedings of the Institute of Acoustics, 2009.
- [Zhang 98] Ming Zhang, Kah-Chye Tan, and M. H. Er, “A Refined Algorithm of 3-D Sound Synthesis”, proceedings of ICSP, 1998.
- [Zotkin 03] Dniitry N. Zotkin, Jane Hwaiig. Rainani Duraiswami, L.arry S. Davis, “HRTF Personalization Using Anthropometric Measurements”, I&E Workshop on Applications of Signal Proccrvnp to Audio and Acoustics, October 2003.

→ Libros

- [Begault 94] Begault D.R., “3-D sound for virtual reality and multimedia”, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.
- [Blanco Martín 09] Blanco-Martín E., Tesis Doctoral “Medidas objetivas de localización de un evento sonoro para sistemas de teleconferencia”, Escuela Técnica de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [Blauert 97] Blauert J.; “Spatial hearing. The psychophysics of human sound localization”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [Cabrera 97] Cabrera Pareja, Carlos, “Psicoacústica”, Trabajo Fin de Carrera, Escuela Técnica de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 1997.
- [López Hernández 06] López Hernández R.M., Proyecto Fin de Carrera “Medida de las HRTFS”, Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos en Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Febrero 2006.
- [Merino 10] Merino Saez-Miera, Silvia, “Medida y comparación de las HRTF del HATS 4100D de B&K”, Escuela Técnica de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [Pérez Miñana 99] Pérez Miñana, José, “Compendio práctico de acústica”, Barcelona, 1999.
- [Zwicker 98] Zwicker, E., “Psychoacoustics: facts and models”, Springer-Verlag, 1998.

→ Páginas web

- www.google.es
- <http://scholar.google.es/>
- www.youtube.com
- <http://www.aes.org/journal/>
- <http://acousticalsociety.org/>
- <http://www.journals.elsevier.com/applied-acoustics/>
- <http://wokinfo.com/>
- http://www.ieee.org/publications_standards/publications/periodicals/index.html
- <http://www.bksv.com/>
- <http://www.sciencedirect.com/>
- <http://www.mecd.gob.es/biblioteca-central/recursos-electronicos/revistas.html>
- <http://www.slideshare.net/miguelataurima/creacin-de-interfaces-grficas-con-MATLAB-guide>
- <http://web.usal.es/~gfdc/docencia/GuiSection.pdf>
- <http://www.uma.es/ficha.php?id=74604#introduccion>

Tabla de figuras

Figura 1. Sistema de coordenadas esférico, muestra tanto los planos de definición para la cabeza como las principales coordenadas caracterizadas por los ángulos ϕ y θ .	10
Figura 2. Representación gráfica de la ITD en función del ángulo de azimut.	11
Figura 3. Esquema para el cálculo de la diferencia interaural de tiempo.	11
Figura 4. La respuesta en frecuencia se ve alterada función del azimut.	12
Figura 5. Izquierda: La ITD es menor que la longitud de onda, y derecha: La ITD es mayor que la longitud de onda haciendo confusa la determinación del azimut.[Cheng 99]	13
Figura 6. Representación de las zonas del espectro donde son más influyentes la ITD e ILD.	13
Figura 7. Efecto del pabellón auditivo en la respuesta en frecuencia para dos valores de elevación.	14
Figura 8. Cono de confusión [Begault 00], donde se dan resultados iguales (ITD e ILD).	14
Figura 9. Fenómeno de localización en el plano medio caracterizado por la señal de excitación.	15
Figura 10. Gráfica representativa de la dependencia del ángulo de elevación en la precisión.	15
Figura 11. La imagen muestra cambios espectrales debido a la influencia de moldes en los oídos.	16
Figura 12. Imagen que representa la precisión de la distancia.[Blauert 97]	16
Figura 13. Representación esquemática de la disposición necesaria para la medida de HRTF.	19
Figura 14. Representación de la disposición fuente-receptor para la medida de HRTF.[Merino 10]	20
Figura 15. Representación visual de la resolución en grados para la obtención de datos.	21
Figura 16. Gráfico que muestra el proceso de obtención de los diferentes datos relevantes.	22
Figura 17. Función de transferencia en el dominio z .	23
Figura 18. HRTF del oído izquierdo y del oído derecho, representa el módulo y la fase para 72 valores ($\phi=0^\circ$).	24
Figura 19. HRTF del oído izquierdo y del oído derecho, representa el módulo expresado en decibelios en función de la frecuencia.	25
Figura 20. Función de transferencia en el dominio temporal discreto.	26
Figura 21. Representa el cálculo de las señales binaurales a partir de la señal de la fuente y las HRTF.	26
Figura 22. Representaciones de HRIR izquierda y derecha, amplitud de la señal en función del azimut y tiempo, arriba $\phi=0^\circ$ y abajo $\phi=40^\circ$.	27
Figura 23. Gráficas de la respuesta al impulso que muestran la amplitud de la señal en función del tiempo.	28
Figura 24. Diferencias interaurales de tiempo y nivel, representación en función del azimut y la frecuencia en ms o dB, respectivamente.	29
Figura 25. Gráficas de representación de ITD $\phi=0^\circ$ (izquierda) e ILD $\phi=40^\circ$ (derecha) en función del azimut.	30
Figura 26. Representación de los puntos necesarios para realizar la interpolación.	31
Figura 27. Representación de las tablas ITD e ILD interpoladas, contiene los límites de interpolación en el plano horizontal.	33
Figura 28. Muestra el proceso necesario para la apertura del editor de diseño de GUIs.	36
Figura 29. Listado de componentes de una GUI en MATLAB.	37
Figura 30. Imagen que representa la ventana principal del GUI.	37
Figura 31. El inspector de propiedades agrupa características modificables de cada componente.	38
Figura 32. Estructura del código que controla las funciones de la interfaz gráfica de usuario.	39
Figura 33. Camino de acceso y creación de las funciones que controlan el componente.	40

Figura 34. Resultado final de la apariencia y de la disposición de componentes en la interfaz diseñada.	41
Figura 35. Apariencia principal de la interfaz gráfica de usuario.	45
Figura 36. Dos ejes son tratados como los componentes principales de representación gráfica.	46
Figura 37. Componentes de representación angular, phi y theta.	47
Figura 38. Archivos de la base de datos de HRTF.	47
Figura 39. Representación esférica de los puntos en el espacio.	48
Figura 40. Panel de introducción de ángulos de la base de datos de HRTF.	49
Figura 41. Panel de opciones de representación.	49
Figura 42. Panel de introducción de datos de interpolación.	50
Figura 43. Diagrama de flujo de la GUI, sintetiza los estados, las funciones y las acciones principales.	51
Figura 44. Estado principal de la interfaz, se presentan dos opciones de introducción	52
Figura 45. Opción numero 1 para la introducción de ángulos de phi.	53
Figura 46. Opción numero 1 para la introducción de ángulos de theta.	54
Figura 47. Muestra la representación de la GUI de los puntos introducidos en los tres ejemplos.	55
Figura 48. Aspecto final en la representación de puntos contenidos en la base de datos de HRTF.	56
Figura 49. Cuatro ejemplos de introducción de datos para realizar la interpolación.	57
Figura 50. Representación espacial de los puntos seleccionados para representar.	58
Figura 51. Aspecto final en la representación de puntos para realizar la interpolación.	59
Figura 52. Alternancia de estados de introducción de datos.	60
Figura 53. Panes de opciones de representación.	61
Figura 54. Representación gráfica conmutando el botón “Mostrar hrir” desde opción 1.	62
Figura 55. Representación gráfica conmutando el botón “Mostrar hrir” desde opción 2.	63
Figura 56. Representa la función del botón “Mostrar ITD/ILD” independientemente del estado de representación y desde la opción 1.	64
Figura 57. Representa la función del botón “Mostrar ITD/ILD” independientemente del estado de representación y desde la opción 2.	65
Figura 58. Esquema del proceso seguido para el trabajo de investigación.	68

Acrónimos y símbolos de interés

HATS	Head and Torso Simulator.
HRTF	Head Related Transfer Function.
HRIR	Head-Related Impulse Response.
ITD	Interaural Time Difference.
ILD	Interaural Level Difference.
φ	Ángulo de elevación (phi).
θ	Ángulo de azimut (theta).
MATLAB	MATrix LABoratory